2ª edición

Materiales para ingeniería civil

Michael S. Mamlouk
John P. Zaniewski

PEARSON
Prentice Hall

Materiales para Ingeniería civil

SEGUNDA EDICIÓN

Materiales para Ingeniería civil

SEGUNDA EDICIÓN

MICHAEL S. MAMLOUK
JOHN P. ZANIEWSKI

TRADUCCIÓN
Vuelapluma



Datos de catalogación bibliográfica

MATERIALES PARA INGENIERÍA CIVIL
Michael S. Mamlouk, John P. Zaniewski

PEARSON EDUCACIÓN, S. A., Madrid, 2009
ISBN: 978-84-8322-510-3

Materia: 624, Ingeniería civil

Formato: 195 × 250 mm Páginas: 616

Ribera del Loira, 28
28042 Madrid (España)
www.pearsoneducación.com

ISBN: 978-84-8322-510-3

Depósito legal:

PEARSON PRENTICE HALL es un sello editorial autorizado de PEARSON EDUCACIÓN, S. A.

Equipo editorial:
Editor: Miguel Martín-Romo
Técnico editorial: Malu Martínez

Equipo de producción:
Director: José A. Clares
Técnico: Irene Iriarte

Diseño de cubierta: Equipo de diseño de Pearson Educación, S. A.
Composición: Vuelapluma
Impreso por:

IMPRESO EN ESPAÑA - *Printed in Spain.*

Este libro ha sido impreso con papel y tintas ecológicos



CONTENIDO

Prefacio xvi



UNO
Conceptos sobre ingeniería de materiales 1

1.1 Factores económicos 2

1.2 Propiedades mecánicas 3

1.2.1 · Condiciones de carga 4
1.2.2 · Relaciones esfuerzo–deformación 4
1.2.3 · Comportamiento elástico 6
1.2.4 · Comportamiento elastoplástico 9
1.2.5 · Trabajo y energía 13
1.2.6 · Respuesta dependiente del tiempo 14
1.2.7 · Modelos reológicos 15
1.2.8 · Efectos de la temperatura y del tiempo 19
1.2.9 · Fallos y seguridad 21

1.3 Propiedades no mecánicas 23

1.3.1 · Densidad y peso específico 23
1.3.2 · Expansión térmica 24
1.3.3 · Características superficiales 26

1.4 Producción y construcción 27

1.5 Características estéticas 27

1.6 Variabilidad de los materiales 27

1.6.1 · Muestreo 29
1.6.2 · Distribución normal 30
1.6.3 · Diagramas de control 31
1.6.4 · Error experimental 33

1.7 Equipos de medida de laboratorio 34

1.7.1 · Galgas 35
1.7.2 · Transformador diferencial variable lineal (LVDT) 36

1.7.3 · Galgas extensimétricas 38
1.7.4 · Anillo de calibración 40
1.7.5 · Celda de carga 41
Resumen 42
Cuestiones y problemas 43
1.8 Referencias 52



DOS
Naturaleza de los materiales 54

2.1 Conceptos básicos sobre materiales 54
2.1.1 · Configuración electrónica 54
2.1.2 · Enlaces 57
2.1.3 · Clasificación de los materiales según el tipo de enlace 61
2.2 Materiales metálicos 61
2.2.1 · Estructura reticular 62
2.2.2 · Defectos de la retícula 67
2.2.3 · Estructura granular 67
2.2.4 · Aleaciones 70
2.2.5 · Diagramas de fase 71
2.2.6 · Efectos combinados 77
2.3 Sólidos inorgánicos 77
2.4 Sólidos orgánicos 80
2.4.1 · Desarrollo, estructura e interenlaces de los polímeros 81
2.4.2 · Fusión y temperatura de transición del vidrio 84
2.4.3 · Propiedades mecánicas 84
Resumen 86
Cuestiones y problemas 86
2.5 Referencias 89



TRES
Acero 90

3.1 Producción del acero 91
3.2 Diagrama de fases hierro–carbono 94
3.3 Tratamiento térmico del acero 98
3.3.1 · Recocido 98

3.3.2 · Normalización 99
3.3.3 · Endurecimiento 100
3.3.4 · Templado 100
3.3.5 · Ejemplo de tratamiento térmico 100

3.4 Aleaciones del acero 101

3.5 Acero estructural 103
3.5.1 · Tipos de acero estructural 103
3.5.2 · Tipos de secciones 106
3.5.3 · Aceros especiales en aplicaciones estructurales 109

3.6 Productos de sujeción 112

3.7 Armaduras de acero 114

3.8 Pruebas mecánicas del acero 118
3.8.1 · Prueba de tensión 118
3.8.2 · Prueba de torsión 122
3.8.3 · Prueba de impacto con péndulo de Charpy 125
3.8.4 · Prueba de flexión 128
3.8.5 · Prueba de dureza 128
3.8.6 · Pruebas ultrasónicas 130

3.9 Soldadura 130

3.10 Corrosión del acero 133
3.10.1 · Métodos de resistencia a la corrosión 134

Resumen 135

Cuestiones y problemas 136

3.11 Referencias 143



CUATRO

Aluminio 144

4.1 Producción de aluminio 146

4.2 Metalurgia del aluminio 150
4.2.1 · Sistema de designación de las aleaciones 151
4.2.2 · Tratamientos de revenido 152

4.3 Pruebas y propiedades del aluminio 155

4.4 Soldadura y fijación 161

4.5 Corrosión 161

Resumen 162

Cuestiones y problemas 162

4.6 Referencias 166



CINCO

Áridos 167

5.1 Fuentes de áridos 167

5.2 Clasificación geológica 168

5.3 Evaluación de las fuentes de áridos 169

5.4 Usos de los áridos 170

5.5 Propiedades de los áridos 171

5.5.1 · Forma y textura superficial de las partículas 171
5.5.2 · Consistencia y durabilidad 174
5.5.3 · Tenacidad, dureza y resistencia a la abrasión 175
5.5.4 · Absorción 176
5.5.5 · Gravedad específica 177
5.5.6 · Peso unitario y huecos del árido 179
5.5.7 · Resistencia y módulo 180
5.5.8 · Granulometría y tamaño máximo 181
5.5.9 · Sustancias nocivas en los áridos 198
5.5.10 · Reactividad álcali-árido 198
5.5.11 · Afinidad por el asfalto 200

5.6 Manipulación de los áridos 200

5.6.1 · Muestreo de áridos 201

Resumen 203

Cuestiones y problemas 203

5.7 Referencias 210



SEIS

Cemento portland 211

6.1 Producción del cemento portland 211

6.2 Composición química del cemento portland 212

6.3 Finura del cemento portland 213

6.4 Gravedad específica del cemento portland 214

6.5 Hidratación del cemento portland 215

6.5.1 · Desarrollo de la estructura en la pasta de cemento 217
6.5.2 · Evaluación del progreso de la hidratación 217

6.6 Huecos en el cemento hidratado 219

6.7 **Propiedades del cemento hidratado** 219
6.7.1 · Fraguado 220
6.7.2 · Consistencia 221
6.7.3 · Resistencia a la compresión 222
6.8 **Relación agua–materiales cementosos** 222
6.9 **Tipos de cemento portland** 224
6.9.1 · Tipos estándar de cemento portland 224
6.9.2 · Otros tipos de cemento 227
6.10 **Agua para la mezcla** 227
6.10.1 · Criterios de aceptación del agua 228
6.10.2 · Eliminación y reutilización del agua de lavado del hormigón 228
6.11 **Aditivos para el hormigón** 229
6.11.1 · Agentes aireantes 231
6.11.2 · Reductores de agua 232
6.11.3 · Retardantes 236
6.11.4 · Aditivos de control de la hidratación 236
6.11.5 · Aceleradores 237
6.11.6 · Aditivos cementosos suplementarios 238
6.11.7 · Aditivos especializados 241
Resumen 242
Cuestiones y problemas 243
6.12 **Referencias** 247



SIETE

Hormigón de cemento portland 248

7.1 **Proporciones para las mezclas de hormigón** 249
7.1.1 · Pasos básicos para los métodos basados en el peso y en el volumen absoluto 250
7.1.2 · Mezclas de hormigón para proyectos de pequeña envergadura 267
7.2 **Mezclado, colocación y manipulación del hormigón fresco** 269
7.2.1 · Hormigón premezclado 270
7.2.2 · Hormigón mezclado con dosificador móvil 271
7.2.3 · Depósito del hormigón 271
7.2.4 · Hormigón bombeado 271
7.2.5 · Vibración del hormigón 274
7.2.6 · Errores y precauciones a la hora de mezclar agua 275

7.2.7 · Medida del contenido de aire en el hormigón fresco 275
7.2.8 · Distribución y acabado del hormigón 278

7.3 Curado del hormigón 280
7.3.1 · Inundación o inmersión 282
7.3.2 · Pulverización o nebulización 282
7.3.3 · Cubiertas húmedas 282
7.3.4 · Láminas de plástico o papel impermeables 282
7.3.5 · Compuestos membranógenos 283
7.3.6 · Conservación de los encofrados 286
7.3.7 · Curado por vapor 286
7.3.8 · Cubiertas aislantes 286
7.3.9 · Curado eléctrico, mediante aceite caliente e infrarrojos 287
7.3.10 · Periodo de curado 287

7.4 Propiedades del hormigón endurecido 287
7.4.1 · Cambio inicial de volumen 287
7.4.2 · Propiedades de reptación 288
7.4.3 · Permeabilidad 289
7.4.4 · Relación esfuerzo–deformación 290

7.5 Pruebas del hormigón endurecido 292
7.5.1 · Prueba de resistencia a la compresión 293
7.5.2 · Prueba de compresión diametral 295
7.5.3 · Prueba de resistencia a la flexión 296
7.5.4 · Prueba con el esclerómetro 298
7.5.5 · Prueba de resistencia a la penetración 298
7.5.6 · Prueba de velocidad de pulsos ultrasónicos 299
7.5.7 · Prueba de maduración 300

7.6 Alternativas al hormigón convencional 300
7.6.1 · Hormigón autoconsolidante 301
7.6.2 · Relleno fluido 302
7.6.3 · Cemento proyectado 304
7.6.4 · Hormigón ligero 306
7.6.5 · Hormigón pesado 307
7.6.6 · Hormigón de alta resistencia 308
7.6.7 · Hormigón compensador de la contracción 309
7.6.8 · Polímeros y hormigón 309
7.6.9 · Hormigón reforzado con fibra 310
7.6.10 · Hormigón compactado a rodillo 311
7.6.11 · Hormigón de altas prestaciones 311

Resumen 313

Cuestiones y problemas 313

7.7 Referencias 319



OCHO

Mampostería 320

8.1 Elementos de mampostería 320

8.1.1 · Elementos de mampostería de hormigón 321

8.1.2 · Ladrillos de arcilla sólidos 326

8.2 Mortero 329

8.3 Lechada de cemento 330

8.4 Enlucido 330

Resumen 331

Cuestiones y problemas 331

8.5 Referencias 334



NUEVE

Aglomerantes asfálticos y mezclas asfálticas 335

9.1 Tipos de productos asfálticos 338

9.2 Usos del asfalto 339

9.3 Susceptibilidad térmica del asfalto 342

9.4 Propiedades químicas del asfalto 344

9.5 Superpave y aglomerantes PG 346

9.6 Caracterización del asfalto 347

9.6.1 · Enfoque de caracterización PG 347

9.6.2 · Caracterización PG de los aglomerantes 348

9.6.3 · Pruebas tradicionales de caracterización del asfalto 354

9.6.4 · Caracterización de emulsiones y asfaltos fluidificados 356

9.7 Clasificación de los asfaltos 357

9.7.1 · Aglomerantes asfálticos 357

9.7.2 · Asfaltos fluidificados 363

9.7.3 · Emulsiones asfálticas 364

9.8 Hormigón asfáltico 364

9.9 Diseño de mezclas de hormigón asfáltico 366

9.9.1 · Preparación de probetas en el laboratorio 366

9.9.2 · Análisis de huecos y de la densidad 369

9.9.3 · Diseño de mezclas Superpave 373

9.9.4 · Pruebas simples de comportamiento (SPT) de Superpave 383

9.9.5 · Método Marshall para el diseño de mezclas 387
9.9.6 · Método Hveem para el diseño de mezclas 395
9.9.7 · Evaluación de la susceptibilidad a la humedad 396

9.10 Caracterización del hormigón asfáltico 397
9.10.1 · Resistencia indirecta a la tracción 398
9.10.2 · Prueba diametral del determinación del módulo de resiliencia 398
9.10.3 · Prueba de congelación y descongelación 400
9.10.4 · Uso de modelos reológicos para analizar la respuesta dependiente del tiempo 401

9.11 Producción de hormigón asfáltico 401

9.12 Reciclado del hormigón asfáltico 402
9.12.1 · Reciclado de superficie 403
9.12.2 · Reciclado en la planta central 403
9.12.3 · Reciclado a pie de obra 404

9.13 Aditivos 404
9.13.1 · Rellenos 405
9.13.2 · Extendedores 405
9.13.3 · Caucho 405
9.13.4 · Plásticos 405
9.13.5 · Agentes para mejorar la adhesividad 405
9.13.6 · Otros 405

Resumen 406

Cuestiones y problemas 406

9.14 Referencias 413



DIEZ

Madera 415

10.1 Estructura de la madera 417
10.1.1 · Anillos de crecimiento 417
10.1.2 · Naturaleza anisotrópica de la madera 419

10.2 Composición química 421

10.3 Grado de humedad 421

10.4 Producción de madera 423
10.4.1 · Técnicas de corte 425
10.4.2 · Curado 426

10.5 Clasificación estructural 427
10.5.1 · Clasificación visual 427

10.6 Defectos de la madera 428

10.7 Propiedades físicas 432

10.7.1 · Gravedad específica y densidad 432

10.7.2 · Propiedades térmicas 433

10.7.3 · Propiedades eléctricas 434

10.8 Propiedades mecánicas 434

10.8.1 · Módulo de elasticidad 435

10.8.2 · Propiedades de resistencia 435

10.8.3 · Reptación 436

10.8.4 · Capacidad de amortiguación 436

10.9 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas 436

10.9.1 · Ensayo de flexión estática 437

10.9.2 · Ensayos de compresión 438

10.10 Consideraciones de diseño 440

10.11 Organismos que degradan la madera 441

10.11.1 · Hongos 441

10.11.2 · Bacterias 442

10.11.3 · Insectos 442

10.11.4 · Organismos marinos 442

10.12 Preservación de la madera 443

10.12.1 · Disoluciones basadas en petróleo 443

10.12.2 · Preservantes hidrosolubles 443

10.12.3 · Técnicas de aplicación 444

10.12.4 · Precauciones de construcción 444

10.13 Productos de madera manufacturados 445

10.13.1 · Paneles/chapas estructurales 447

10.13.2 · Formas estructurales 449

10.13.3 · Elementos estructurales compuestos 460

Resumen 460

Cuestiones y problemas 461

10.14 Referencias 466



ONCE

Compuestos 468

11.1 Compuestos microscópicos 469

11.1.1 · Compuestos reforzados con fibra 470

11.1.2 · Compuestos reforzados con partículas 471

11.1.3 · Fase matriz 472

11.1.4 · Fabricación 472
11.1.5 · Aplicaciones de ingeniería civil 472

11.2 Compuestos macroscópicos 478
11.2.1 · Hormigón de cemento portland normal 478
11.2.2 · Hormigón de cemento portland reforzado 478
11.2.3 · Hormigón asfáltico 479
11.2.4 · Madera manufacturada 480

11.3 Propiedades de los compuestos 480
11.3.1 · Carga paralela a las fibras 481
11.3.2 · Carga perpendicular a las fibras 483
11.3.3 · Compuestos de fibras orientadas aleatoriamente 484
11.3.4 · Compuestos reforzados con partículas 485

Resumen 485

Cuestiones y problemas 486

11.4 Referencias 488



Apéndice

Experimentos

1. Introducción a los dispositivos de medida 490
2. Ensayo de tracción del acero y el aluminio 494
3. Ensayo de torsión para el acero y el aluminio 498
4. Prueba de impacto del acero 501
5. Inspección microscópica de materiales 504
6. Análisis granulométrico de áridos 506
7. Gravedad específica y absorción del árido grueso 512
8. Gravedad específica y absorción de áridos finos 515
9. Peso específico en seco y huecos en los áridos 518
10. Asentamiento del hormigón de cemento portland mezclado fresco 521
11. Peso específico y fluencia del hormigón mezclado fresco 524
12. Contenido de aire del hormigón mezclado fresco por el método de presión 527
13. Contenido de aire del hormigón mezclado fresco por el método volumétrico 529
14. Preparación y curado de probetas de hormigón 531
15. Refrentado de probetas cilíndricas de hormigón con azufre o un compuesto de recubrimiento 535
16. Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón 537
17. Resistencia a la flexión del hormigón 540
18. Número esclerométrico del hormigón endurecido 543
19. Resistencia a la penetración del hormigón endurecido 545
20. Ensayos con elementos de mampostería de hormigón 548

21. Viscosidad del aglomerante asfáltico 551
22. Ensayo con reómetro de cortante dinámica para aglomerantes asfálticos 553
23. Prueba de penetración del cemento asfáltico 556
24. Viscosidad absoluta del asfalto 558
25. Preparación y determinación de la densidad de probetas de asfalto mezclado en caliente mediante el compactador giratorio Superpave 560
26. Preparación de probetas de hormigón asfáltico con el compactador de Marshall 564
27. Gravedad específica en seco de mezclas bituminosas compactadas 568
28. Flujo y estabilidad de Marshall del hormigón asfáltico 571
29. Pruebas de flexión y compresión para la madera 573
30. Propiedades de tracción de los plásticos 578

Índice 581

PREFACIO

Una función básica de la ingeniería civil y de la construcción es la de satisfacer y mantener las necesidades de infraestructura de la sociedad. Esa infraestructura incluye los edificios, los sistemas de tratamiento y distribución de aguas, los sistemas de eliminación y procesamiento de aguas residuales, los diques y los puentes, y los pavimentos de autopistas y aeropuertos. Aunque algunos ingenieros civiles y de la construcción están implicados en el proceso de planificación, la mayoría de ellos se dedica al diseño, construcción y mantenimiento de ese tipo de instalaciones. El denominador común entre esas responsabilidades es la necesidad de comprender el comportamiento y las prestaciones de los materiales. Aunque no todos los ingenieros civiles y de la construcción necesitan ser especialistas en materiales, una comprensión básica del proceso de selección y del comportamiento de los mismos es un requisito fundamental para todos esos ingenieros involucrados en el diseño, construcción y mantenimiento.

Los requisitos de materiales en instalaciones de ingeniería civil y de la construcción son diferentes de las de otras disciplinas de ingeniería. Frecuentemente, las estructuras de ingeniería civil requieren toneladas de materiales, con un número relativamente bajo de réplicas de diseños específicos. Generalmente, los materiales empleados en ingeniería civil tienen también un coste unitario relativamente bajo. En muchos casos, las estructuras de ingeniería civil se forman o se fabrican a pie de obra en condiciones adversas. Finalmente, muchas estructuras de ingeniería civil están directamente expuestas a los efectos adversos del entorno.

El tema de los materiales de ingeniería ha registrado un enorme avance en las últimas décadas. Como resultado, muchos de los materiales convencionales han sido sustituidos por otros materiales más eficientes o han sido modificados para mejorar sus prestaciones. Los ingenieros civiles y de la construcción deben ser conscientes de estos avances y ser capaces de seleccionar el material más efectivo en términos de coste, o usar los modificadores apropiados para cada aplicación específica.

Este texto está organizado en tres partes: (1) introducción a la ingeniería de materiales, (2) características de los materiales utilizados en ingeniería civil y de la construcción y (3) métodos de laboratorio para la evaluación de materiales.

La introducción a la ingeniería de materiales incluye información sobre las propiedades mecánicas básicas de los materiales, la influencia del medio ambiente y las clases básicas de materiales. Además, una de las responsabilidades de los ingenieros civiles y de la construcción es la inspección y control de calidad de los materiales durante el proceso de construcción. Esto requiere una compresión de la variabilidad de los materiales

y de los procesos de ensayo. El texto también cubre la estructura atómica de los materiales, para proporcionar una compresión básica del comportamiento de los mismos y para relacionar su estructura molecular con su respuesta en las aplicaciones de ingeniería.

La segunda sección, que representa una gran parte del libro, presenta las características de los tipos principales de materiales utilizados en ingeniería civil y de la construcción: acero, aluminio, hormigón, mampostería, asfalto y madera. Puesto que las explicaciones acerca de los materiales de hormigón y asfálticos requieren un conocimiento básico de los áridos, también se ha incluido un capítulo dedicado a estos. Además, dado que los compuestos están ganando una aceptación cada vez mayor entre los ingenieros y están sustituyendo a muchos de los materiales convencionales, se ha incluido un capítulo en el que se presenta este tipo de materiales compuestos.

La exposición sobre cada tipo de material incluye información sobre los siguientes aspectos:

- Estructura básica de los materiales.
- Proceso de producción del material.
- Comportamiento mecánico del material y otras propiedades.
- Influencia del medioambiente.
- Consideraciones de construcción.
- Cuestiones especiales relacionadas con el material presentado en cada capítulo.

Por último, cada capítulo incluye una panorámica de diversos procedimientos de prueba, con el fin de introducir los métodos que se usan con cada material. Sin embargo, la descripción detallada de estos procedimientos se deja para las organizaciones apropiadas de normalización como la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Estas normas ASTM y AASHTO suelen estar disponibles en las bibliotecas y animamos a los estudiantes a consultarlas. Asimismo, hemos incluido problemas de ejemplo en la mayoría de los capítulos, así como una serie seleccionada de cuestiones y problemas al final de cada uno. Responder a estas cuestiones y problemas permitirá al estudiante una mejor compresión de los temas tratados.

Existen muchos volúmenes de información disponibles para cada uno de estos materiales. No es posible, ni tampoco deseable, cubrir estos materiales de forma exhaustiva en un único texto introductorio. En lugar de ello, este libro limita la información a un nivel inicial, se concentra en las prácticas actuales y extrae aquella información que resulta relevante para una formación general de ingenieros civiles y de la construcción.

El contenido del libro está pensado para cubrirse en un semestre académico, aunque también puede emplearse en cursos cuatrimestrales. El profesor también puede modificar el énfasis de algunos temas, con el fin de adaptar el texto al currículum específico del departamento. Además, puesto que el curso suele incluir una serie de prácticas de laboratorio, en el texto se describen diversos métodos de ensayo. El número de ensayos de laboratorio incluido en el libro supera con creces lo que normalmente hace falta en un semestre típico, con el fin de proporcionar al profesor una

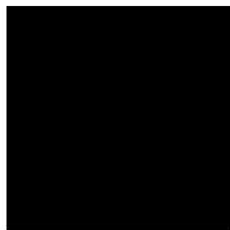
mayor flexibilidad a la hora de utilizar los equipos disponibles. Los ensayos de laboratorio deberían coordinarse con los temas cubiertos en las clases teóricas, de modo que los estudiantes puedan sacar el máximo provecho de su experiencia en el laboratorio.

La primera edición de este libro ha cubierto las necesidades de muchas universidades y escuelas técnicas. Es por eso que esta segunda edición es principalmente una mejora y actualización del libro, con algunas adiciones reseñables. Se han hecho diversas modificaciones en el capítulo dedicado al acero, para mejorar la descripción de los tratamientos térmicos, el diagrama de fases y los efectos de la soldadura. Asimismo, se ha añadido una sección sobre el acero inoxidable y se ha proporcionado información actualizada sobre los usos estructurales del acero. Los capítulos dedicados al cemento y al hormigón se han ampliado con secciones relativas a los aditivos de control de la hidratación, utilización de agua reciclada, el humo de sílice, el hormigón auto-consolidante y el relleno fluido. Cuando se publicó la primera edición, el método de diseño de mezclas Superpave estaba empezando a ser introducido en el sector. Ahora, Superpave es un método bien establecido, que ha sido probado en aplicaciones prácticas y revisado para satisfacer mejor las necesidades de la industria de la pavimentación. Este desarrollo ha obligado a realizar una revisión completa del capítulo dedicado al asfalto, incluyéndose los procedimientos y métodos actuales para la clasificación de los aglomerantes asfálticos según su rendimiento y el método de diseño de mezclas Superpave. El capítulo dedicado a la madera se ha revisado para proporcionar información sobre productos de madera manufacturados recientes, que han empezado a estar disponibles en los últimos años. Asimismo, dado que los compuestos poliméricos reforzados con fibra han empezado utilizarse de forma más habitual para restaurar estructuras antiguas o parcialmente dañadas, hemos añadido diversos ejemplos alusivos en el capítulo dedicado a los compuestos. En el manual de laboratorio, se ha añadido un experimento sobre el peso específico del árido compactado, que se utiliza para establecer las proporciones del hormigón de cemento portland (PCC). Además, el experimento sobre la fluencia del hormigón asfáltico se ha eliminado, dado que ya no se usa.

Además de las revisiones que afectan al contenido técnico, el libro incluye ahora más de cien nuevas figuras, con el fin de ilustrar mejor los conceptos y los equipos. Se han añadido a cada capítulo varios problemas de ejemplo y cuestiones para que el lector trabaje con ellos fuera del aula, lo que permitirá a los profesores variar de un semestre a otro los problemas asignados a los alumnos.

Los autores quieren agradecer las contribuciones de los doctores Barzin Mobasher y Chris Lawrence de la Universidad del estado de Arizona, de Jim Willson y Paul Mueller de la Asociación del cemento portland, de Mansour Solimanian de la Universidad del estado de Pensilvania, de Lary Lenke de la Universidad de Nuevo Méjico y de Nabil Grace de la Universidad tecnológica Lawrence por sus consejos y por habernos facilitado algunas fotografías y enunciados de problemas. También queremos manifestar nuestra gratitud a Serif El-Badawy de la Universidad del estado de Arizona, por su contribución a la hora de preparar el manual de soluciones.

1



CONCEPTOS SOBRE INGENIERÍA DE MATERIALES

Los ingenieros de materiales son responsables de seleccionar, especificar y realizar el control de calidad de los materiales que van a emplear en su trabajo. Estos materiales tienen que cumplir determinados criterios o propiedades (Ashby y Jones, 1980). Entre los tipos de criterios se incluyen los siguientes:

- Factores económicos.
- Propiedades mecánicas.
- Propiedades no mecánicas.
- Consideraciones de producción/construcción.
- Propiedades estéticas.

Al seleccionar el material para una aplicación específica, los ingenieros tienen que tener en cuenta diversos criterios y llegar a ciertos compromisos. Tanto el cliente como el propósito de la instalación o estructura dictan, hasta cierto punto, el énfasis que habrá que poner en cada uno de los criterios.

Los ingenieros civiles y de la construcción deben estar familiarizados con los materiales usados en la construcción de un amplio rango de estructuras. Entre los materiales más frecuentemente utilizados se incluyen el acero, los áridos, el hormigón, la mampostería, el asfalto y la madera. Otros materiales menos utilizados son el aluminio, el vidrio, los plásticos y los compuestos de fibra reforzados. Los ingenieros geotécnicos suelen insistir en que es el propio terreno el material más ampliamente utilizado en ingeniería. Sin embargo, en este texto, no se estudian las propiedades de los terrenos, porque normalmente suele ser el tema de un curso independiente.

Avances recientes en la tecnología de los materiales utilizados en ingeniería civil han dado lugar al desarrollo de materiales de mejor calidad, más económicos y más seguros. Estos materiales se denominan habitualmente materiales de alto rendimiento. Gracias a que cada vez se sabe más acerca de la estructura molecular de los materiales y a los continuos esfuerzos de investigación de científicos e ingenieros, nuevos materiales como los polímeros, adhesivos, compuestos, geotextiles, recubrimientos, metales conformados en frío y distintos productos sintéticos, están compitiendo con los materiales tradicionales empleados en ingeniería civil. Además, los materiales existentes se

han mejorado, cambiando sus estructuras moleculares o incluyendo aditivos con el fin de mejorar su calidad, coste y rendimiento. Por ejemplo, los superplastificantes han hecho avanzar a la industria del hormigón, permitiendo la producción de hormigón mucho más robusto. Las uniones realizadas con materiales elastoméricos han mejorado la seguridad de las estructuras de gran altura en áreas donde se producen terremotos. Los agregrados sintéticos ligeros han disminuido el peso de las estructuras de hormigón, permitiendo que los componentes tengan áreas con una sección transversal pequeña. Se han mezclado polímeros con asfalto, lo que ha hecho que los pavimentos duren más tiempo y sean más resistentes al efecto de las cargas de los vehículos y las condiciones ambientales.

El campo de los materiales de fibra se ha desarrollado rápidamente en los últimos 30 años. Muchos proyectos modernos de ingeniería civil han utilizado compuestos reforzados con fibra. Estos compuestos más recientes compiten con los materiales tradicionales a causa de su más alta relación resistencia-peso y a su capacidad de eliminar problemas tales como la corrosión. Por ejemplo, el hormigón reforzado con fibra tiene una dureza mucho mayor que el hormigón convencional de cemento portland. Los compuestos pueden reemplazar al acero reforzado en estructuras de hormigón. De hecho, los compuestos han permitido la construcción de estructuras que en el pasado no se podrían haber llevado a cabo.

La naturaleza y el comportamiento de los materiales empleados en la ingeniería civil son tan complejos como los de los materiales utilizados en cualquier otro campo de la ingeniería. Debido a la gran cantidad de materiales empleados en los proyectos de ingeniería civil, frecuentemente los ingenieros trabajan con los materiales disponibles localmente, los cuales no están tan refinados como los materiales usados en otros campos de la ingeniería. En consecuencia, los materiales utilizados en ingeniería civil tienen propiedades y características muy variables.

Este capítulo aborda la forma en que las propiedades de los materiales afectan a su selección y comportamiento en las aplicaciones de ingeniería civil. Además, se repasan algunas definiciones y conceptos básicos de ingeniería mecánica que son necesarios para comprender cómo se comportan los materiales. También se aborda la naturaleza variable de las propiedades de los materiales, con el fin de que el ingeniero pueda comprender los conceptos de precisión y exactitud, muestreo, aseguramiento de la calidad y control de calidad. Por último, se describen los instrumentos utilizados para medir la respuesta de los materiales.

1.1 Factores económicos

Los costes del proceso de selección de materiales se ven influenciados por muchos más factores que el coste del material. Entre los factores que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar materiales hay que incluir:

- Disponibilidad y coste de los materiales en bruto.

- Costes de fabricación.
- Transporte.
- Colocación.
- Mantenimiento.

Los materiales empleados en las estructuras de ingeniería civil han ido cambiando con el tiempo. Las primeras estructuras se construían con piedra y madera. Estos materiales eran muy abundantes y podían cortarse y conformarse con las herramientas disponibles. Más tarde, se utilizó el hierro fundido, cuando las fundiciones comenzaron a ser capaces de refinar hasta cierto grado el mineral de hierro. Al producirse la Revolución Industrial, pudieron fabricarse las grandes cantidades de acero de calidad que requerían las grandes estructuras. Además, el cemento portland, desarrollado a mediados del siglo XIX, proporcionó a los ingenieros civiles un material barato y duradero con una gran variedad de aplicaciones.

En general, en los países occidentales, existen eficientes sistemas de transporte que hacen que la disponibilidad no suponga un problema una vez que se ha seleccionado un material. Sin embargo, el transporte de los materiales puede incrementar significativamente el coste de los mismos. Por ejemplo, en muchos lugares, no es posible conseguir fácilmente áridos de calidad para el hormigón y el asfalto. Si la fuente de suministro de áridos más próxima a una determinada ciudad se encuentra a, por ejemplo, unos 150 km, esta distancia puede duplicar aproximadamente el coste de los áridos en destino, lo que coloca al hormigón en desventaja frente al acero.

El tipo de material seleccionado para un determinado trabajo influye enormemente en la facilidad de construcción y en los costes y tiempos de la misma. Por ejemplo, los elementos estructurales de un edificio con estructura de acero pueden ser fabricados en un taller, transportados al lugar donde vaya hacerse la construcción, colocarse mediante una grúa y soldarse después. Por el contrario, en el caso de un edificio de hormigón armado, deben crearse los encofrados, colocarse la armadura de acero, colocar y mezclar el hormigón y dejar que endurezca y retirar después los encofrados. La construcción de un edificio con estructura de hormigón puede ser mucho más compleja y puede llevar más tiempo que la construcción de estructuras de acero. Para salvar este inconveniente, comúnmente se emplean unidades de hormigón prefabricadas, especialmente en la construcción de puentes.

Todos los materiales se deterioran con el tiempo y el uso, lo que afecta tanto a los costes de mantenimiento como a la vida útil de la estructura. La tasa de deterioro varía de unos materiales a otros. Por tanto, al analizar los factores económicos de un material, debe evaluarse el coste del ciclo de vida y los costes iniciales de la estructura.

1.2 Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de un material se define como la respuesta del mismo a las cargas externas. Todos los materiales se deforman como respuesta a las cargas;

sin embargo, la respuesta específica de un material depende de sus propiedades, de la magnitud y tipo de carga y de la geometría del elemento. El que un material "falle" bajo condiciones de carga depende del criterio de fallo que se defina. Un fallo catastrófico de un elemento estructural, que dé lugar al derrumbamiento de la estructura, es un fallo obvio del material. Sin embargo, en algunos casos, el fallo es más sutil, pero con consecuencias igualmente graves. Por ejemplo, un pavimento puede fallar debido a una rugosidad excesiva de la superficie, incluso aunque los niveles de resistencia necesarios se encuentren dentro de las capacidades del material. Un edificio puede tener que ser precintado a causa de vibraciones excesivas provocadas por el viento u otras cargas naturales, aunque sea estructuralmente sólido. Estos son ejemplos de fallos *funcionales*.

1.2.1 Condiciones de carga

Una de las consideraciones en el diseño de un proyecto es el tipo de carga al que la estructura estará sometida durante su vida útil. Los dos tipos básicos de carga son: cargas estáticas y cargas dinámicas. Cada uno de estos tipos afecta al material de forma diferente y, frecuentemente, las interacciones entre los tipos de carga son importantes. Al diseñar una estructura, los ingenieros deben calcular ambos tipos de carga.

La carga *estática* implica una carga constante en la estructura a lo largo de un periodo de tiempo. Generalmente, las cargas estáticas se aplican lentamente, de manera que no se generan sacudidas o vibraciones en la estructura. Una vez aplicada, la carga estática puede permanecer o eliminarse lentamente. Las cargas que permanecen durante un periodo de tiempo largo se denominan cargas *constantes* (propias). En ingeniería civil, gran parte de la carga que los materiales deben soportar se debe al peso de la estructura y de los equipos contenidos en ella.

Las cargas que generan sacudidas o vibraciones en una estructura son las cargas *dinámicas*. Estas cargas se pueden clasificar como *periódicas, aleatorias* y *transitorias,* como se muestra en la Figura 1.1 (Richart *et al.*, 1970). Una carga periódica, como por ejemplo una carga armónica o sinusoidal, se repite a sí misma a lo largo del tiempo. Por ejemplo, un equipo giratorio en un edificio puede producir una carga vibratoria. En una carga aleatoria, el patrón de carga nunca se repite, como por ejemplo en el caso de las cargas producidas por los terremotos. Por otro lado, una carga transitoria es un impulso de carga que se aplica durante un intervalo de tiempo corto, después del cual las vibraciones disminuyen hasta que el sistema vuelve a su estado de reposo. Por ejemplo, los puentes deben diseñarse para soportar las cargas transitorias de los camiones.

1.2.2 Relaciones esfuerzo–deformación

Los materiales se deforman en respuesta a las cargas o fuerzas. En 1678, Robert Hooke publicó los primeros hallazgos que documentaban una relación lineal entre la cantidad de fuerza aplicada a un elemento y su deformación. La cantidad de deformación es proporcional a las propiedades del material y sus dimensiones. El efecto de las dimensiones se puede normalizar. Dividiendo la fuerza entre el área de la sección transversal del

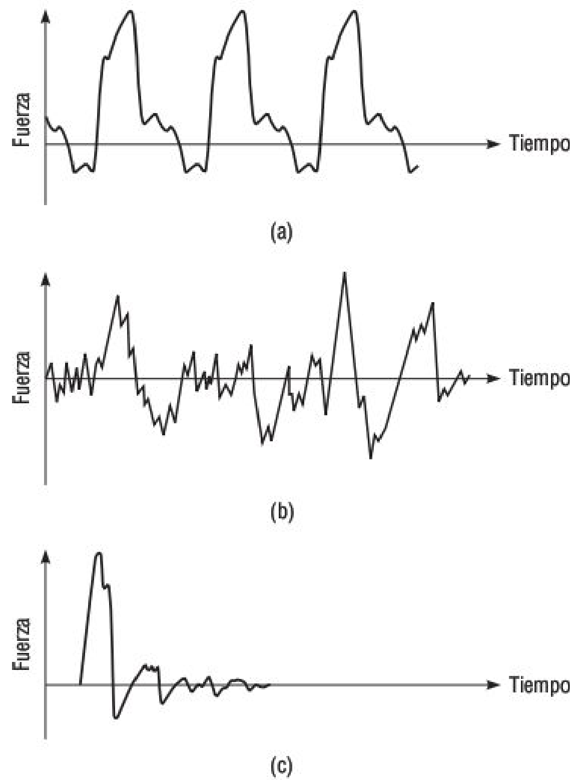


FIGURA 1.1 Tipos de cargas dinámicas: (a) periódica, (b) aleatoria y (c) transitoria.

elemento se normaliza el efecto del área cargada. La fuerza por unidad de área se define como el esfuerzo σ ejercido sobre el elemento (es decir, σ = Esfuerzo/Área). El cociente entre el alargamiento y la longitud se define como la deformación ε del elemento (es decir, ε = Variación de longitud/Longitud original). A partir del diagrama esfuerzo-deformación es posible obtener mucha información útil acerca de un material.

La Figura 1.2 muestra varias curvas típicas monoaxiales de esfuerzo–deformación para tracción o compresión para diversos materiales de ingeniería. La Figura 1.2(a) muestra una relación esfuerzo–deformación lineal, hasta el punto en que falla el material. Entre los materiales típicos que presentan este comportamiento frente a la tracción están el cristal y el yeso. La Figura 1.2(b) muestra el comportamiento del acero sometido a tensión. Aquí, se obtiene una relación lineal hasta un cierto punto (límite de proporcionalidad), después del cual el material se deforma sin que se produzca un gran incremento de esfuerzo. Por otro lado, las aleaciones de aluminio exhiben una relación esfuerzo–deformación lineal hasta el límite de proporcionalidad, después del cual existe una relación no lineal, como se ilustra en la Figura 1.2(c). La Figura 1.2(d) muestra una relación no lineal a lo largo de todo el rango. El hormigón y otros materiales presentan este tipo de relación, aunque la primera parte de la curva correspondiente al hormigón es bastante próxima al caso lineal. El caucho blando sometido a tensión difiere de la ma-

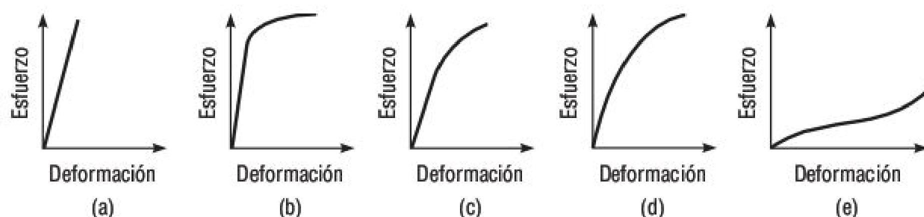


FIGURA 1.2 Diagramas típicos monoaxiales esfuerzo-deformación para algunos materiales de ingeniería: (a) cristal y yeso, (b) acero, (c) aleaciones de aluminio, (d) hormigón y (e) caucho blando.

yoría de los materiales, en el sentido de que muestra una relación esfuerzo–deformación casi lineal seguida de una curva invertida, como se muestra en la Figura 1.2(e).

1.2.3 Comportamiento elástico

Si un material exhibe un verdadero comportamiento elástico, debe tener una respuesta (deformación) instantánea a la carga, y el material debe volver a su forma original cuando la carga se elimina. Muchos materiales, incluyendo la mayoría de los metales, presentan un comportamiento elástico, al menos para niveles de esfuerzo bajos. Como veremos en el Capítulo 2, la deformación elástica no modifica la disposición de los átomos dentro del material, sino que lo que hace es provocar un estiramiento de los enlaces existentes entre los átomos. Cuando se elimina la carga, los enlaces atómicos vuelven a su posición original.

Young observó que los diferentes materiales elásticos presentan constantes de proporcionalidad diferentes entre el esfuerzo y la deformación. Para un material elástico homogéneo, isotrópico y lineal, la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo normal y la deformación normal de un elemento axialmente cargado es el *módulo de elasticidad* o *módulo de Young, E,* que es igual a

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1.1}$$

donde σ es el esfuerzo normal y ε es la deformación normal.

En la prueba de tensión axial, a medida que el material se alarga, se produce una reducción de la sección transversal en la dirección lateral. En la prueba de compresión axial, se produce el fenómeno contrario. La relación entre la deformación lateral, ε_l, y la deformación axial, ε_a, se denomina *relación de Poisson,*

$$\nu = \frac{-\varepsilon_l}{\varepsilon_a} \tag{1.2}$$

Puesto que las deformaciones axial y lateral siempre tendrán signo distinto, se incluye un signo negativo en la Ecuación 1.2 para hacer que la relación sea positiva. La relación de Poisson tiene un rango teórico que va de 0,0 a 0,5, donde 0,0 es para un material compresible en el que las direcciones axial y lateral no se afecten entre sí. El valor 0,5 corresponde a un material que no cambia de volumen cuando se

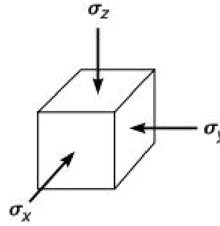


FIGURA 1.3 Esfuerzos normales aplicados a un elemento cúbico.

aplica la carga. La mayoría de los sólidos presentan relaciones de Poisson comprendidas entre 0,10 y 0,45.

Aunque el módulo de Young y la relación de Poisson se definieron para la condición de esfuerzo monoaxial, también son importantes a la hora de describir las relaciones esfuerzo–deformación tridimensionales. Si se somete a un elemento cúbico homogéneo e isotrópico con respuesta elástica lineal a esfuerzos normales σ_x, σ_y y σ_z en las tres direcciones ortogonales (como se muestra en la Figura 1.3), pueden calcularse las deformaciones normales ε_x, ε_y y ε_z mediante la *ley de Hooke generalizada,*

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)}{E}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)}{E}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \tag{1.3}$$

Problema de ejemplo 1.1

Un cubo de una aleación cuyas dimensiones son 50 mm × 50 mm × 50 mm, se coloca en una cámara de presión y se somete a una presión de 90 MPa. Si el módulo de elasticidad de la aleación es de 100 GPa y la relación de Poisson es de 0,28, ¿cuál será la longitud de cada lado del cubo, suponiendo que el material permanezca dentro de la región elástica?

Solución

$\varepsilon_x = [\sigma_x - \nu\,(\sigma_y + \sigma_z)\,]/E\;\;[-90\;-0{,}28 \times (-90-90)]/100.000$

$= -0{,}000396$ m/m

$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -0{,}000396$ m/m

$\Delta x = \Delta y = \Delta z = -0{,}000396 \times 50 = -0{,}0198$ mm

$L_{nueva} = 50 - 0{,}0198 = 49{,}9802$ mm

■

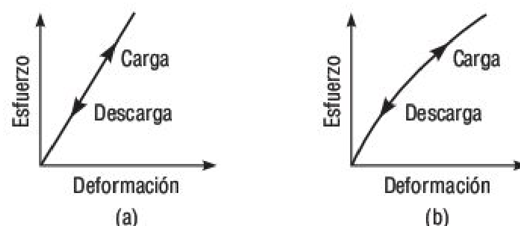


FIGURA 1.4 Comportamiento elástico: (a) lineal y (b) no lineal.

No hay que confundir linealidad con elasticidad. La relación esfuerzo–deformación de un *material lineal* sigue una línea recta. Por su parte, un *material elástico* vuelve a su forma original cuando se elimina la carga y reacciona instantáneamente a las variaciones de la carga. Por ejemplo, la Figura 1.4(a) representa un comportamiento elástico lineal, mientras que la Figura 1.4(b) representa un comportamiento elástico no lineal.

Para los materiales que no muestran un comportamiento lineal, como el hormigón y el terreno, puede resultar problemático determinar el módulo de Young o módulo de elasticidad. Para estos materiales, existen diversas opciones para definir arbitrariamente el módulo. La Figura 1.5 muestra cuatro opciones: los módulos de tangente inicial, de tangente, de secante y de cuerda. El *módulo de tangente inicial* es la pendiente de la tangente a la curva de esfuerzo–deformación en el origen. El *módulo de tangente* es la pendiente de la tangente en un punto determinado de la curva esfuerzo–deformación. El *módulo de secante* es la pendiente de una cuerda trazada entre el origen y un punto arbitrario de la curva esfuerzo–deformación. El *módulo de cuerda* es la pendiente de una cuerda trazada entre dos puntos de la curva esfuerzo–deformación. La selección del módulo que hay que usar para un material no lineal dependerá del nivel de esfuerzo o de deformación con el que se vaya a utilizar normalmente el material. Asimismo, al

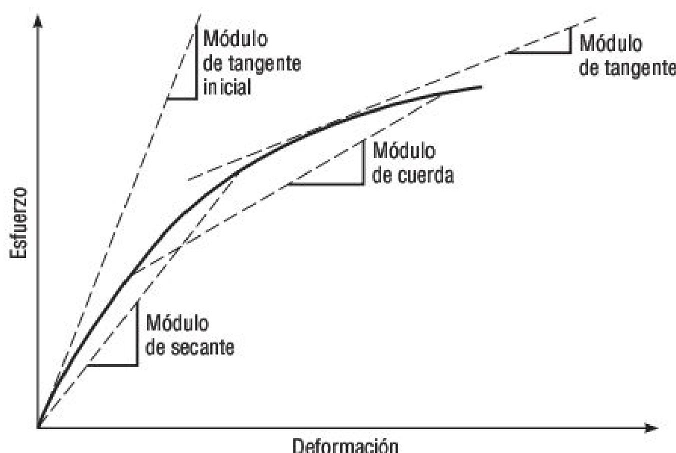


FIGURA 1.5 Métodos para aproximar el módulo.

determinar los módulos de tangente, de secante o de cuerda, es necesario definir los niveles de esfuerzo o deformación.

La Tabla 1.1 muestra valores típicos del módulo y de la relación de Poisson para algunos materiales a temperatura ambiente. Observe que algunos materiales tienen un rango de valores de módulo en lugar de tener un valor determinado. Son varios los factores que afectan al módulo, como el grado de curado y las proporciones de los componentes del hormigón o la dirección de la carga en relación a la granularidad de la madera.

1.2.4 Comportamiento elastoplástico

Para algunos materiales, a medida que se incrementa el esfuerzo aplicado al elemento, la deformación se incrementará de manera proporcional hasta alcanzar un cierto punto. Después de ese punto, la deformación se incrementará aplicando muy poco esfuerzo adicional. En este caso, el material exhibe un comportamiento elástico lineal, seguido de una respuesta plástica. El nivel de esfuerzo para el que el comportamiento cambia de elástico a plástico se denomina *límite de elasticidad*. Cuando la carga se elimina del elemento, parte de la deformación se recuperará y otra parte será permanente, como puede verse en la Figura 1.6(a). Como veremos en el Capítulo 2, el comportamiento plástico indica una deformación permanente del elemento, de modo que éste no vuelve a su forma original al eliminar la carga. Esto indica que, cuando se aplica la carga, los enlaces atómicos se estiran o comprimen, dando lugar a una respuesta elástica. A continuación, los átomos pasan a deslizarse realmente los unos con respecto a los otros. Cuando se elimina la carga, el deslizamiento atómico no se revierte; sólo se revierte el estiramiento o compresión de los enlaces atómicos (Callister, 2003).

TABLA 1.1 Valores típicos del módulo y de la relación de Poisson (temperatura ambiente).

Material	Módulo GPa (psi $\times 10^6$)	Relación de Poisson
Acero	207 (30)	0,27
Aluminio	69–75 (10–11)	0,33
Caucho (blando)	0,001–0,014 (0,00015–0,002)	0,49
Cobre	110 (16)	0,35
Cristal	62–70 (9–10)	0,25
Epoxy	3–140 (0,4–20)	
Ladrillo	10–17 (1,5–2,5)	0,23–0,40
Hierro fundido	75–169 (11–23)	0,17
Hormigón	14–40 (2–6)	0,11–0,21
Piedra caliza	58 (8,4)	
Madera	6–15 (0,9–2,2)	
Tungsteno	407 (59)	0,28

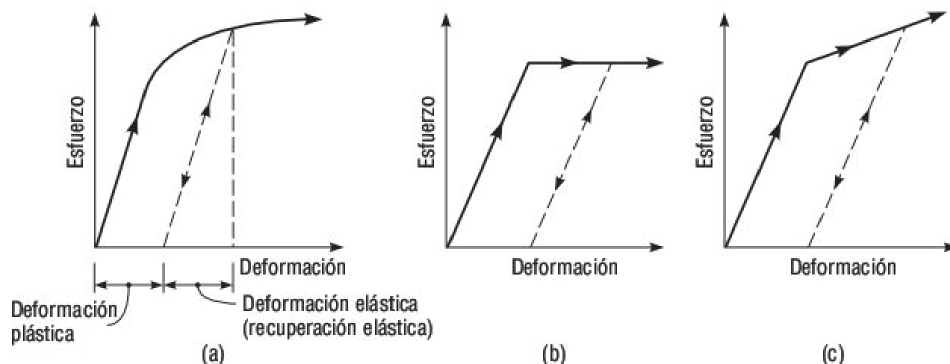


FIGURA 1.6 Comportamiento de esfuerzo–deformación de los materiales plásticos: (a) ejemplo de carga y descarga, (b) elástico–perfectamente plástico y (c) elastoplástico con endurecimiento por deformación.

Se utilizan diversos modelos para representar el comportamiento de los materiales que exhiben tanto una respuesta elástica como plástica. La Figura 1.6(b) muestra una respuesta elástica lineal–plástica perfecta, en la que el material exhibe, al ser cargado, una respuesta elástica lineal, seguida de una respuesta completamente plástica. Si dicho material se descarga después de que se haya deformado plásticamente, se recuperará de una forma elástica lineal y seguirá una línea recta paralela a la parte elástica de la curva, de manera que el material presentará una cierta deformación permanente. Si se vuelve a cargar el material, tendrá una respuesta elástica lineal, seguida de una respuesta plástica para el mismo nivel de esfuerzo para que el que se descargó el material (Popov 1968).

La Figura 1.6(c) muestra una respuesta elastoplástica en la que la primera parte es una respuesta elástica seguida de una combinación de respuesta elástica y plástica. Si se elimina la carga después de la deformación plástica, la relación esfuerzo–deformación seguirá una línea recta paralela a la parte elástica; en consecuencia, se eliminará parte de la deformación del material, mientras que el resto de la deformación se convertirá en permanente. Al volver a cargar el material, éste se comportará de nuevo de forma elástica lineal, hasta el nivel de esfuerzo conseguido en el ciclo de esfuerzo anterior. Después de ese punto, el material seguirá la curva original de esfuerzo–deformación. Por tanto, el esfuerzo requerido para provocar una deformación plástica se va incrementando. Este proceso de denomina *endurecimiento por deformación* o *endurecimiento por tratamiento mecánico*. El endurecimiento por deformación puede ser beneficioso en algunos casos, dado que permite aplicar un mayor esfuerzo sin que se produzca una deformación permanente. El acero dulce es un ejemplo de material que experimenta un endurecimiento por deformación durante la deformación plástica.

Algunos materiales exhiben lo que se denomina un *ablandamiento por deformación*, que consiste en que la deformación plástica provoca un debilitamiento del material. El hormigón de cemento portland es un buen ejemplo de este tipo de material. En este caso, la deformación plástica provoca microfisuras en la interfaz entre el árido y la pasta de cemento.

Problema de ejemplo 1.2

Un material elastoplástico con endurecimiento por deformación tiene la relación mostrada en la Figura 1.6(c). El módulo de elasticidad es 25×10^6 psi, la resistencia de fluencia es igual a 70 ksi y la pendiente de la parte de endurecimiento por deformación del diagrama de esfuerzo–deformación es 3×10^6 psi.

a. Calcule la deformación correspondiente a un esfuerzo de 80 ksi.
b. Si se elimina el esfuerzo de 80 ksi, calcule la deformación permanente.

Solución

(a) $\varepsilon = (70.000/25 \times 10^6) + [(80.000 - 70.000)/(3 \times 10^6)] = 0{,}0028 + 0{,}0033$
$= 0{,}0061$ pulg./pulg.

(b) $\varepsilon_{\text{permanente}} = 0{,}0061 - [80.000/(25 \times 10^6)] = 0{,}0061 - 0{,}0032$
$= 0{,}0029$ pulg./pulg.

Los materiales que no sufren una deformación plástica antes de fallar, como el hormigón, se denominan *frágiles*, mientras que los materiales que muestran una deformación plástica apreciable, como por ejemplo el acero dulce, se denominan *dúctiles*. Generalmente, para la construcción se prefiere emplear materiales dúctiles. Cuando un material frágil falla, la estructura puede colapsarse de manera catastrófica. Por otro lado, si se sobrecarga un material dúctil, pueden producirse distorsiones en la estructura, pero ésta no necesariamente tiene que colapsar. Por tanto, los materiales dúctiles proporcionan al diseñador un cierto margen de seguridad.

La Figura 1.7(a) ilustra tres conceptos de la relación esfuerzo–deformación de los materiales elastoplásticos. El punto más bajo mostrado en el diagrama es el *límite de proporcionalidad*, definido como el punto de transición entre el comportamiento lineal y el no lineal. El segundo punto es el *límite de elasticidad*, que es la transición entre el comportamiento elástico y el plástico. Sin embargo, la mayoría de los materiales no presentan un cambio brusco del comportamiento elástico al plástico. En lugar de ello, hay una transición gradual, casi imperceptible, entre ambos comportamientos, lo que hace difícil localizar un punto exacto de transición (Polowski y Ripling, 1966). Por esta razón, se han utilizado métodos arbitrarios para identificar el límite de elasticidad, como los métodos de *desvío* y de *extensión*, definiendo así el *esfuerzo de fluencia (resistencia de fluencia).* Con el método de desvío, se mide una desviación especificada en la abscisa y se dibuja una línea que pase por este punto y con una pendiente igual al módulo de tangente inicial. El punto en que esta línea se cruza con la curva de esfuerzo–deformación es el *esfuerzo de fluencia de desvío* del material, como se puede ver en la Figura 1.7(a). Para los diferentes materiales se utilizan distintos desvíos (Tabla 1.2). El *esfuerzo de fluencia de extensión* se sitúa donde una proyección vertical para un nivel de esfuerzo especificado intersecta con la curva de esfuerzo–deformación. La Figura 1.7(b) muestra el esfuerzo de fluencia correspondiente a una extensión del 0,5%.

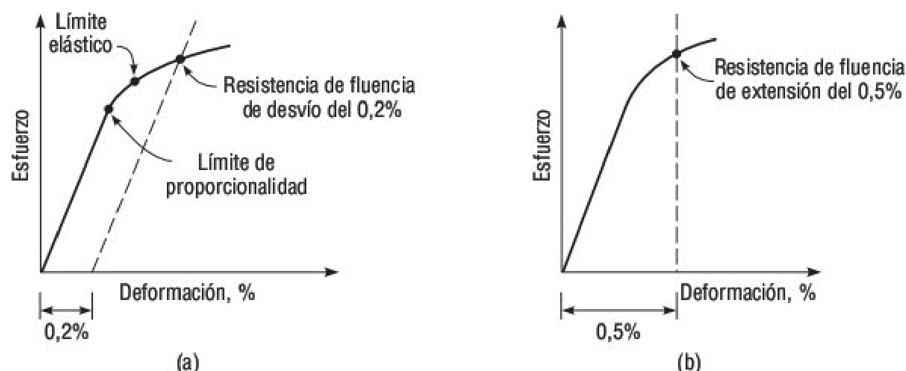


FIGURA 1.7 Métodos para estimar el esfuerzo de fluencia: (a) método de desvío y (b) método de extensión.

TABLA 1.2 Valores de desvío utilizados típicamente para determinar el esfuerzo de fluencia.

Material	Condición de esfuerzo	Desvío (%)	Deformación correspondiente
Acero	Tensión	0,20	0,0020
Aleaciones de aluminio	Tensión	0,20	0,0020
Fundición gris	Tensión	0,05	0,0005
Hormigón	Compresión	0,02	0,0002
Latón y bronce	Tensión	0,35	0,0035
Madera	Compresión paralela a la veta	0,05	0,0005

Problema de ejemplo 1.3

Una varilla de aleación de aluminio, con una longitud nominal de 100 mm, un diámetro de 10 mm y una resistencia de fluencia de 150 MPa, se somete a una carga de tracción de 5,85 kN. Si la longitud cambia a 100,1 mm y el diámetro a 9,9967 mm, calcule el módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Solución

$$\sigma = P/A = (5850 \text{ N})/[\pi(5 \times 10^{-3} \text{ m})^2] = 74{,}5 \times 10^6 \text{ Pa} = 74{,}5 \text{ MPa}$$

Puesto que el esfuerzo aplicado está bastante por debajo de la resistencia de fluencia, el material se encuentra dentro de la región elástica.

$$\varepsilon_a = \Delta L/L = (100{,}1 - 100)/100 = 0{,}001$$

$E = \sigma/\varepsilon_a = 74{,}5/0{,}001 = 74.500$ MPa $= 74{,}5$ GPa

$\varepsilon_l =$ variación de diámetro/diámetro $= (9{,}9967 - 10)/10 = -0{,}00033$

$\nu = -\varepsilon_l/\varepsilon_a = 0{,}00033/0{,}001 = 0{,}33$

1.2.5 Trabajo y energía

Cuando se prueba un material, lo que hace la máquina de pruebas es generar una fuerza con el objeto de desplazar o deformar el objeto. Puesto que el trabajo es igual a la fuerza multiplicada por la distancia, el área situada bajo una curva de fuerza–desplazamiento será el trabajo realizado sobre el elemento. Cuando se divide la fuerza entre el área de la sección transversal del elemento para calcular el esfuerzo, y la variación de longitud se divide entre la longitud del elemento para obtener la deformación, el diagrama de fuerza–desplazamiento se transforma en un diagrama de esfuerzo–deformación. Sin embargo, el área situada bajo el diagrama de esfuerzo–deformación ya no tendrá unidades de trabajo. Manipulando las unidades del diagrama esfuerzo–deformación, podemos ver que el área bajo ese diagrama es igual al trabajo por unidad de volumen de material que se necesita para deformar o romper dicho material. Este concepto es muy útil, ya que nos informa de la energía necesaria para romper el material. Esa información se aplica a la selección de los materiales que habrá que emplear cuando el elemento deba absorber energía. El área bajo la parte elástica de la curva se denomina *módulo de resiliencia* [Figura 1.8(a)]. La cantidad de energía requerida para romper un elemento es una medida de la *tenacidad* del material, como se muestra en la Figura 1.8(b). Como ilustra la Figura 1.8(c), un material de alta resistencia no es necesariamente un material tenaz. Por ejemplo, como se verá en el Capítulo 3, al incrementar el contenido de carbono del acero se incrementa la resistencia de fluencia, pero se reduce la ductilidad. Por tanto, se incrementa la resistencia, pero la tenacidad puede reducirse.

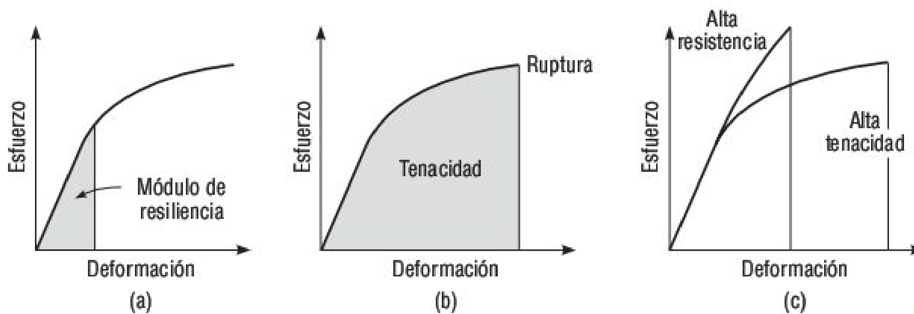


FIGURA 1.8 Áreas bajo las curvas de esfuerzo–deformación: (a) módulo de resiliencia, (b) tenacidad y (c) materiales de alta resistencia y alta tenacidad.

1.2.6 Respuesta dependiente del tiempo

Nuestro análisis anterior presuponía que la deformación era una respuesta inmediata al esfuerzo. Esta suposición se hace para los materiales elásticos. Sin embargo, ningún material presenta esta propiedad bajo todas las condiciones posibles. En algunos casos, los materiales tienen una respuesta retardada. La cantidad de deformación depende de la duración de la carga, de la temperatura y de las características del material. Existen varios mecanismos asociados con la deformación dependiente del tiempo, como son la *reptación* y el *flujo viscoso*. No existe distinción clara entre estos dos términos. La reptación se asocia generalmente con deformaciones a largo plazo y suele tener lugar en metales, cristales iónicos y covalentes, y materiales amorfos. Por otro lado, el flujo viscoso se asocia sólo con los materiales amorfos y puede tener lugar con duraciones de carga a corto plazo. Por ejemplo, el hormigón es un material que tiene predominantemente cristales covalentes y puede sufrir reptación a lo largo de un periodo de décadas. Los pavimentos de hormigón asfáltico, un material de aglomerante amorfo, puede presentar baches causados por el efecto acumulado de flujos viscosos resultantes de las cargas de tráfico, con una duración de carga de sólo una fracción de segundo.

La reptación de metales no es relevante en las aplicaciones típicas de ingeniería civil. En el acero, la reptación puede producirse a temperaturas superiores al 30% del punto de fusión en la escala absoluta. Esto puede resultar un problema en el diseño de calderas y de tanques contenedores para reactores nucleares. La reptación de los metales se produce en tres fases. La primera fase es el resultado de los movimientos de dislocación en la estructura molecular del metal. La segunda fase está asociada con el deslizamiento de los planos de exfoliación, similar a la deformación plástica, pero acelerado debido a la alta temperatura. La tercera fase está asociada con un incremento de la deformación debida a la reducción de la sección transversal del elemento. La reptación también se considera en el diseño de elementos estructurales de madera y compuestos avanzados. Los elementos de madera cargados durante unos días pueden verse obligados a soportar esfuerzos mayores que otros elementos diseñados para soportar cargas "permanentes". Por otro lado, la reptación del hormigón está asociada con microrrupturas producidas en la interfaz entre la pasta de cemento y las partículas de árido (Mehta y Monteiro, 1993).

Los modelos del flujo viscoso son similares en su naturaleza a la ley de Hooke. En los materiales linealmente viscosos, la tasa de deformación es proporcional al nivel de esfuerzo. Estos materiales no son compresibles y no se recuperan cuando se elimina la carga. Los materiales con estas características se denominan *fluidos newtonianos*.

La Figura 1.9(a) muestra una prueba típica de reptación en la que se aplica un esfuerzo compresivo constante a un elemento de hormigón asfáltico. En este caso, se desarrolla una deformación elástica, seguida de una deformación dependiente del tiempo o reptación. Si se elimina la carga del elemento, una parte de la deformación se recuperará de forma instantánea, mientras que la deformación restante se recuperará completa, o parcialmente, a lo largo de un cierto periodo de tiempo. Otro fenómeno típico de los materiales dependientes del tiempo es la relajación, o disipación de los

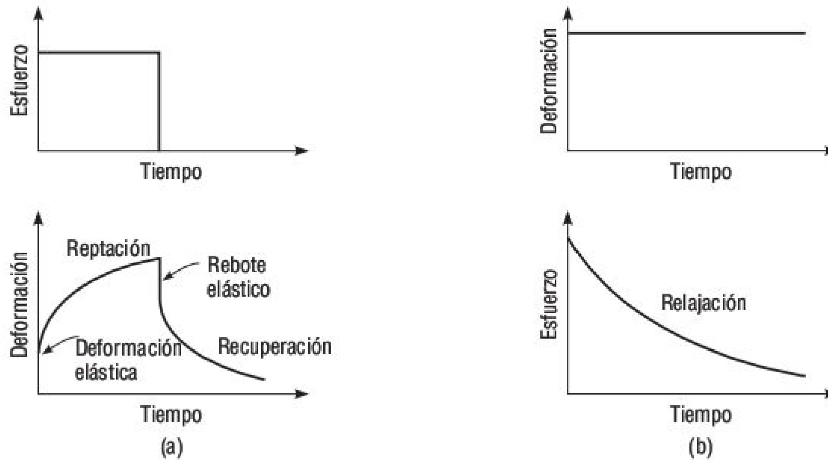


FIGURA 1.9 Comportamiento de los materiales dependientes del tiempo: (a) reptación y (b) relajación.

esfuerzos con el tiempo. Por ejemplo, si se coloca un elemento de hormigón asfáltico en una máquina de carga y se somete a una deformación constante, el esfuerzo en el elemento será inicialmente alto y luego se disipará gradualmente debido a la relajación, como se muestra en la Figura 1.9(b). La relajación es un problema importante en la selección del acero para un diseño con hormigón pretensado.

Los materiales que exhiben respuesta tanto viscosa como elástica reciben el nombre de *viscoelásticos*. En viscoelasticidad, se utilizan dos enfoques para describir las interrelaciones entre el esfuerzo, las deformaciones y el tiempo. Uno de los enfoques consiste en postular la existencia de relaciones matemáticas entre estos parámetros basándose en las funciones de los materiales obtenidas en las pruebas de laboratorio. El otro enfoque está basado en la combinación de una serie de *elementos reológicos* discretos para formar *modelos reológicos*, que describan la respuesta del material.

1.2.7 Modelos reológicos

Los modelos reológicos se emplean para modelar mecánicamente el comportamiento con respecto al tiempo de los materiales. Existen muchos modos diferentes de deformación de los materiales, particularmente en los materiales poliméricos. Estos materiales no se pueden describir simplemente como viscosos, elásticos, etc. Sin embargo, dichos materiales pueden modelarse mediante una combinación de elementos físicos simples. Esos elementos físicos simples tienen características que pueden visualizarse fácilmente. La reología utiliza tres elementos básicos, combinados en serie o en paralelo, para formar modelos que definen comportamientos complejos de los materiales. Los tres elementos reológicos básicos, de Hooke, de Newton y de St. Venant, se muestran en la Figura 1.10 (Polowski y Ripling, 1966).

El elemento de *Hooke*, Figura 1.10(a), tiene las características de un *muelle* lineal. La deformación δ es proporcional a la fuerza F según una constante M:

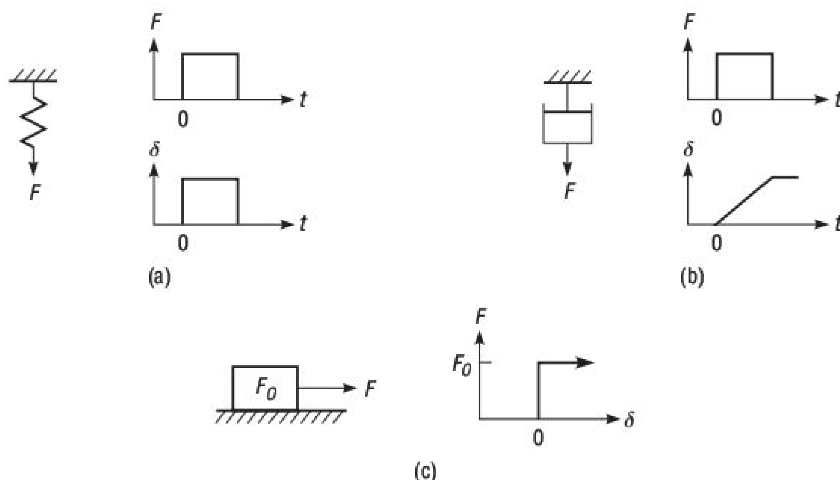


FIGURA 1.10 Elementos básicos utilizados en reología: (a) de Hooke, (b) de Newton y (c) de St. Venant.

$$F = M\delta \tag{1.4}$$

Esto representa un material elástico perfectamente lineal. La respuesta a una fuerza es instantánea y la deformación se recupera completamente al dejar de aplicarse la fuerza. Por tanto, el elemento de Hooke representa un material elástico perfectamente lineal.

Un elemento de *Newton* modela un material perfectamente viscoso y se modela como un *amortiguador* o absorbedor de impactos, como se ve en la Figura 1.10(b). La deformación para un nivel de fuerza determinado es proporcional a la cantidad de tiempo durante el que se aplica la fuerza. Por tanto, la tasa de deformación, para una fuerza constante, es una constante β

$$F = \beta\dot{\delta} \tag{1.5}$$

El punto por encima de δ define esto como la tasa de deformación con respecto al tiempo. Si $\delta = 0$ en el instante $t = 0$ cuando se aplica una fuerza constante F, la deformación en el instante t será

$$\delta = \frac{Ft}{\beta} \tag{1.6}$$

Cuando se deja de aplicar la fuerza, el elemento mantiene su forma deformada. No se recupera ninguna parte de esa deformación.

El elemento de *St. Venant*, como se muestra en la Figura 1.10(c), tiene las características de un bloque deslizante que se resiste al movimiento mediante la fricción. Cuando la fuerza F aplicada al elemento es inferior a la fuerza crítica F_0, no hay movimiento. Si se incrementa la fuerza para vencer la fricción estática, el elemento se deslizará y continuará deslizándose mientras que se aplique la fuerza. Este elemento no es realista, ya que cualquier fuerza sostenida suficiente como para causar un movimiento

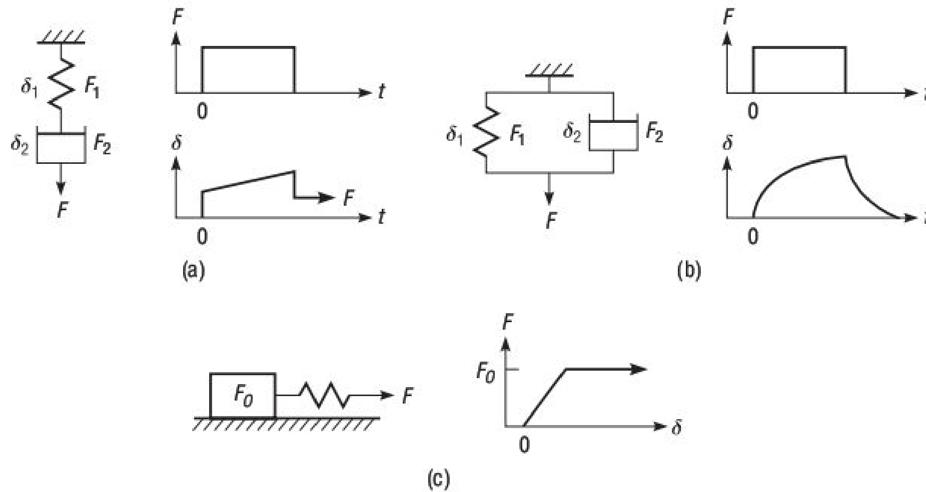


FIGURA 1.11 Modelos reológicos de dos elementos: (a) Maxwell, (b) Kelvin y (c) Prandtl.

haría que el bloque se acelerara. Por tanto, el elemento de St. Venant se utiliza siempre en combinación con los otros elementos básicos.

Los elementos básicos suelen combinarse en paralelo o en serie para modelar la respuesta de los materiales. La Figura 1.11 muestra los tres modelos principales de dos componentes: los modelos de Maxwell, de Kelvin y de Prandtl. Los modelos de Maxwell y de Kelvin tienen un muelle y un amortiguador conectados en serie y en paralelo, respectivamente. El modelo de Prandtl utiliza un muelle y elementos de St. Venant conectados en serie.

En el modelo de *Maxwell* [Figura 1.11(a)], la deformación total es la suma de las deformaciones de los elementos individuales. La fuerza en cada uno de los elementos debe ser igual a la fuerza total ($F = F_1 = F_2$). Por tanto, la ecuación para la deformación total en cualquier instante después de haberse aplicado una carga constante es:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{F}{M} + \frac{Ft}{\beta} \tag{1.7}$$

En el modelo de *Kelvin* [Figura 1.11(b)], la deformación de cada uno de los elementos debe ser igual en todo momento, debido a la manera en que está formulado el modelo. Por tanto, la deformación total es igual a la deformación de cada elemento ($\delta = \delta_1 = \delta_2$). Puesto que los elementos están en paralelo, compartirán la fuerza, de modo que la fuerza total es igual a la suma de la fuerza aplicada a cada elemento. Si $\delta = 0$ en el instante $t = 0$ de aplicar una fuerza constante F, la Ecuación 1.4 requiere entonces una fuerza igual a cero en el muelle. Por tanto, cuando se aplica inicialmente la carga, antes de que se produzca ninguna deformación, toda la fuerza debe estar aplicada en el amortiguador. Con una fuerza constante, la deformación del amortiguador debe incrementarse, ya que hay una fuerza aplicada al elemento. Sin embargo, esto también requiere la deformación del muelle, lo que indica que el muelle soporta parte de la fuerza. De hecho, con el paso del tiempo, la cantidad de fuerza aplicada al amortiguador se redu-

ce y la fuerza del muelle se incrementa. La proporción está fijada por el hecho de que la suma de las fuerzas aplicadas a los dos elementos debe ser igual a la fuerza total. Después de transcurrida una cantidad de tiempo suficiente, toda la fuerza se transferirá al muelle y el modelo dejará de deformarse. Por tanto, la deformación máxima del modelo de Kelvin es $\delta = F/M$. Matemáticamente, la ecuación para la deformación en un modelo de Kelvin se formula como:

$$F = F_1 + F_2 = M\delta + M\dot{\delta} \tag{1.8}$$

Integrando la Ecuación 1.8, utilizando como condición de contorno que $\delta = 0$ en el instante $t = 0$, y despejando la deformación δ para el instante t, obtenemos

$$\delta = \left(\frac{F}{M}\right)(1 - e^{-Mt/\beta}) \tag{1.9}$$

El modelo de *Prandtl* [Figura 1.11(c)] está compuesto por sendos elementos de St. Venant y Hooke en serie. El modelo de Prandtl representa un material con una respuesta elástica–perfectamente plástica. Si se aplica una carga pequeña, el material responde hasta que se alcanza el punto de fluencia, después del cual el material exhibe una deformación plástica.

Ni el modelo de Maxwell ni el modelo de Kelvin describen adecuadamente el comportamiento de algunos materiales comunes en ingeniería, como el hormigón asfáltico. Sin embargo, los modelos de Maxwell y de Kelvin pueden combinarse en serie, lo que da lugar al modelo de *Burgers*, que puede utilizarse para describir de forma simplista el comportamiento del hormigón asfáltico. Como se muestra en la Figura 1.12, el modelo de Burgers suele dibujarse generalmente como un muelle en serie con un modelo de Kelvin y en serie con un amortiguador. La deformación total, cuando $\delta = 0$ en el instante $t = 0$ es igual entonces a la suma de las deformaciones de estos tres elementos:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = \frac{F}{M_1} + \left(\frac{F}{M_2}\right)(1 - e^{-M_2 t/\beta_2}) + \frac{Ft}{\beta_3} \tag{1.10}$$

El diagrama de deformación–tiempo para la parte de carga del modelo de Burgers muestra tres fases distintas de comportamiento. La primera fase es la deformación instantánea del muelle en el momento de aplicar la carga. La segunda fase es la deformación combinada del modelo de Kelvin y del amortiguador. En la tercera fase, después de que el modelo de Kelvin alcanza una deformación máxima, hay una deformación continua del amortiguador con una tasa constante de deformación. La parte de descarga del modelo de Burgers sigue un comportamiento similar.

Algunos materiales requieren modelos reológicos más complejos para representar su respuesta. En tales casos, pueden combinarse en paralelo una serie de modelos de Maxwell para formar el modelo de Maxwell generalizado, o puede usarse un conjunto de modelos de Kelvin en serie para formar el modelo de Kelvin generalizado.

La utilización de modelos reológicos requiere cuantificar los parámetros de los materiales asociados con cada modelo. Las pruebas de laboratorio, como los tests de

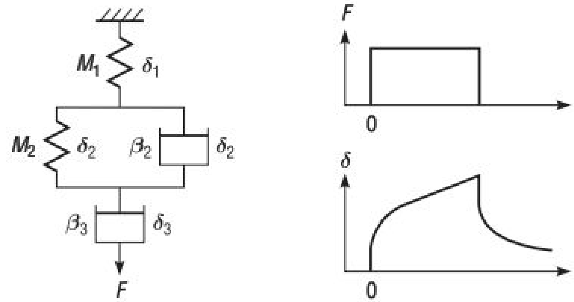


FIGURA 1.12 Modelo de Burgers para materiales viscoelásticos.

reptación, pueden utilizarse para obtener curvas de deformación–tiempo a partir de las cuales se pueden determinar los parámetros de los materiales.

Aunque los métodos reológicos resultan útiles para describir la respuesta dependiente del tiempo de los materiales, solo pueden utilizarse para representar respuestas monoaxiales. El comportamiento tridimensional de los materiales y el efecto de Poisson no pueden representarse mediante estos modelos.

Problema de ejemplo 1.4

Calcule la relación de respuesta para el modelo mostrado en la Figura PE1.4, suponiendo que la fuerza F es constante y se aplica instantáneamente.

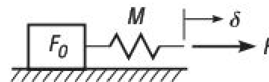


Figura PE1.4

Solución

Para $F \leq F_o$: $\delta = F/M$

Para $F > F_o$: movimiento

1.2.8 Efectos de la temperatura y del tiempo

El comportamiento mecánico de todos los materiales se ve afectado por la temperatura. Sin embargo, algunos materiales son más suceptibles a la temperatura que otros. Por ejemplo, los materiales viscoelásticos, como los plásticos y el asfalto se ven enormemente afectados por la temperatura, incluso si esta varía solo unos pocos grados. Otros materiales, como los metales y el hormigón se ven menos afectados por la temperatura,

especialmente cuando se encuentran a una temperatura próxima a la temperatura ambiente.

Los metales ferrosos, incluyendo el acero, muestran un cambio de comportamiento dúctil a comportamiento frágil cuando la temperatura cae por debajo de la *temperatura de transición*. Este cambio de comportamiento dúctil a frágil reduce enormemente la tenacidad del material. Aunque esto puede determinarse evaluando el diagrama de esfuerzo–deformación a diferentes temperaturas, lo más común es evaluar la tenacidad de un material con una prueba de impacto que mide la energía requerida para fracturar un elemento. La Figura 1.13 muestra cómo varía la energía requerida para fracturar el acero dulce con la temperatura (Flinn y Trojan, 1986). Los resultados de la prueba mostrados en la Figura 1.13 se consiguieron aplicando fuerzas de impacto a una serie de barras con un "defecto" (una simple muesca en V) que había sido explícitamente hecho en las barras (ASTM E23). Durante la Segunda Guerra Mundial, muchos buques de tipo Liberty se hundieron debido a que el acero empleado en ellos cumplía las especificaciones a temperatura ambiente, pero se volvía frágil en las frías aguas del Atlántico Norte.

Además de la temperatura, algunos materiales, como los viscoelásticos, se ven afectados por la duración de la carga. Cuanto más tiempo se aplique la carga, mayor será la cantidad de deformación o de reptación. De hecho, si se incrementa la duración de la carga, la respuesta del material es similar a cuando se incrementa la temperatura. Por tanto, la temperatura y el tiempo pueden intercambiarse. Este concepto es muy útil a la hora de llevar a cabo ciertas pruebas. Por ejemplo, se puede realizar una prueba de reptación en un elemento de hormigón asfáltico con cortas duraciones de carga incrementando la temperatura del material. Entonces, se utiliza un *factor de desplazamiento tiempo–temperatura* para ajustar los resultados para temperaturas más bajas.

Los materiales viscoelásticos no solo se ven afectados por la duración de la carga, sino también por la tasa de aplicación de la misma. Si la carga se aplica a gran velocidad, el material es más rígido que si se aplica a una velocidad menor. Por ejemplo, si un camión pesado pasa a alta velocidad por un pavimento de asfalto, no se observará una deformación permanente. Sin embargo, si se aparca el mismo camión en un pavimento asfáltico en un día caluroso, podrán observarse algunas deformaciones permanentes en la superficie del pavimento.

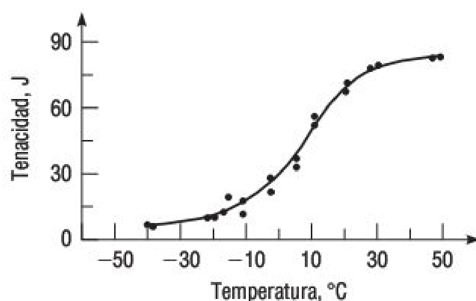


FIGURA 1.13 Tenacidad de fractura del acero sometido a una prueba de impacto.

1.2.9 Fallos y seguridad

Los fallos ocurren cuando un elemento o estructura deja de realizar la función para la que fue diseñado. El fallo de una estructura puede producirse de diversos modos, entre los que se incluyen la fatiga por fractura, la fluencia general, el alabeo y la deformación excesiva. La *fractura* es un modo de fallo común. Un material frágil se fracturará normalmente de forma súbita cuando el esfuerzo estático alcance la resistencia del material, donde la resistencia se define como el esfuerzo máximo que el material puede soportar. Por otro lado, un material dúctil puede fracturarse a causa de una deformación plástica excesiva.

Muchas estructuras, como los puentes, están sujetas a cargas repetidas, creando esfuerzos que son inferiores a la resistencia del material. Los esfuerzos repetidos pueden hacer que un material falle o se *fatigue*, para un nivel de esfuerzo bastante por debajo de la resistencia del material. El número de aplicaciones de carga que un material puede soportar dependerá del nivel de esfuerzo en relación con la resistencia del material. Como se muestra en la Figura 1.14, a medida que se reduce el nivel de esfuerzo, el número de aplicaciones de carga necesarias antes de que se produzca el fallo se incrementa. Los materiales ferrosos tienen un *límite de resistencia a la fatiga* aparente, que es un nivel de esfuerzo por debajo del cual no se produce fatiga. El límite de resistencia a la fatiga para los aceros está, en general, comprendido en el rango que va de un cuarto a un medio de la resistencia del material (Flinn y Trojan, 1986). Otro ejemplo de una estructura que puede fallar debido a la fatiga es el pavimento. Aunque los esfuerzos aplicados por el tráfico son normalmente muy inferiores a la resistencia del material, las cargas repetidas pueden terminar conduciendo a una pérdida de la integridad estructural de la capa superficial del pavimento, provocando fisuras de fatiga como se muestra en la Figura 1.15.

Otro modo de fallo es la *fluencia general*. Este fallo tiene lugar en los materiales dúctiles y se difunde por toda la estructura, lo que da como resultado un colapso total.

Los elementos largos y delgados sujetos a compresión axial pueden fallar debido al *alabeo*. Aunque el elemento esté pensado para soportar cargas de compresión axiales,

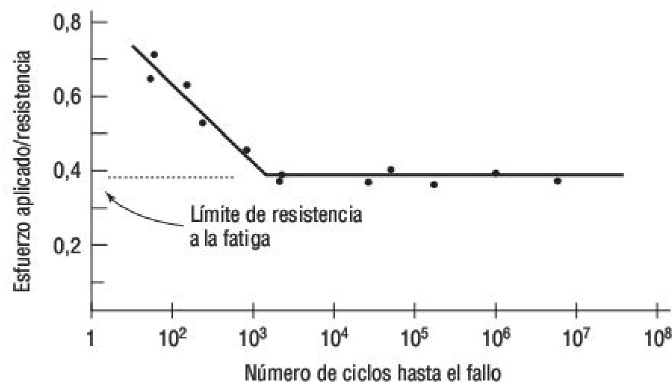


FIGURA 1.14 Ejemplo de límite de resistencia a la fatiga bajo condiciones de carga repetida.



FIGURA 1.15 Fallo de fatiga de un pavimento de asfalto debido a las cargas de tráfico repetidas.

puede que se aplique una pequeña fuerza lateral, que causa una deflexión y puede terminar provocando un fallo.

En ocasiones, una *deformación excesiva* (elástica o plástica) podría definirse como fallo, dependiendo de la función del elemento. Por ejemplo, las deflexiones excesivas de los suelos provocan incomodidad a las personas y, en casos extremos, pueden hacer que un edificio sea inutilizable, a pesar de ser estructuralmente adecuado.

Para minimizar las posibilidades de fallo, las estructuras se diseñan para soportar una carga mayor que la carga máxima prevista. El *factor de seguridad* (*FS*) se define como la relación entre el nivel de esfuerzo de fallo y el máximo nivel de esfuerzo posible según el diseño (esfuerzo máximo previsto):

$$FS = \frac{\sigma_{\text{fallo}}}{\sigma_{\text{tolerable}}} \tag{1.11}$$

donde σ_{fallo} es el esfuerzo de fallo del material y $\sigma_{\text{tolerable}}$ es el esfuerzo tolerable por el diseño. Normalmente, cuanto mayor sea el factor de seguridad, mayor será la sección transversal en la estructura y, en consecuencia, mayor será el coste. El valor adecuado del factor de seguridad varía de una estructura a otra y depende de muchos factores, entre los que se incluyen los siguientes:

- El coste de los fallos impredecibles en vidas humanas, dinero y tiempo.
- La variabilidad de las propiedades de los materiales.

- El grado de precisión a la hora de considerar todas las posibles cargas aplicadas a la estructura, como por ejemplo terremotos.
- Los posibles malos usos de la estructura, como colgar inadecuadamente un objeto del armazón de un techo.
- El grado de precisión al considerar la respuesta apropiada de los materiales durante el diseño, como por ejemplo al suponer una respuesta elástica a pesar de que el material pueda no ser perfectamente elástico.

1.3 Propiedades no mecánicas

Las propiedades no mecánicas hacen referencia a las características del material, distintas de la respuesta a la carga, que afectan a la selección, el uso y el comportamiento de ese material. Hay varios tipos de propiedades que son de interés para los ingenieros, pero las que más preocupan a los ingenieros civiles son la densidad, las propiedades térmicas y las características superficiales.

1.3.1 Densidad y peso específico

En muchas estructuras, el peso propio de los materiales de la estructura contribuye de forma significativa al nivel de esfuerzo total previsto en el diseño. Si el peso de los materiales puede reducirse, también podrá reducirse el tamaño de los elementos estructurales. Por tanto, el peso de los materiales es una consideración importante de diseño. Además, en el diseño de mezclas de asfalto y hormigón, la relación peso–volumen de los áridos y aglomerantes debe tenerse en cuenta al seleccionar las proporciones de la mezcla.

Hay tres términos generales utilizados para describir las relaciones entre la masa, el peso y el volumen de los materiales. La *densidad* es la masa por unidad de volumen de material. El *peso específico* es el peso por unidad de volumen del material. Manipulando las unidades, se puede demostrar que:

$$\gamma = \rho\, g \tag{1.12}$$

donde

γ = peso específico
ρ = densidad
g = aceleración de la gravedad

La *gravedad específica* es la relación entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen igual de agua para una temperatura especificada. La densidad del agua es 1 Mg/m^3 en el sistema SI y 62,4 lb/pie^3 en el sistema británico a 4°C (39.2°F). De acuerdo con la definición, la gravedad específica es equivalente a la densidad del material dividida entre la densidad del agua. Puesto que la densidad del agua en el sistema métrico tiene un valor igual a 1, el valor numérico de la densidad y de la gravedad específica

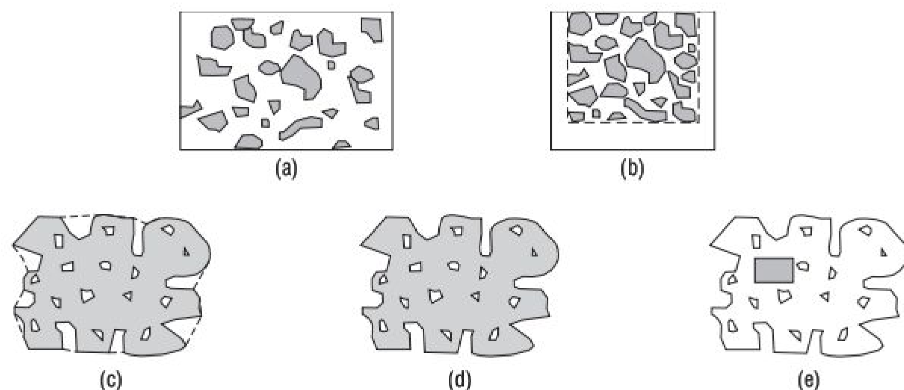


FIGURA 1.16 Definiciones de volumen utilizadas para determinar la densidad: (a) suelto, (b) compactado, (c) volumen total de partículas, (d) volumen no accesible al agua y (e) volumen de los sólidos.

coincide. Este hecho se emplea a menudo en la literatura científica, en la que los términos densidad y gravedad específica se utilizan de forma intercambiable.

Para los materiales sólidos, como los metales, el peso específico, la densidad y la gravedad específica tienen valores numéricos definidos. Para otros materiales, como la madera y los áridos, los propios huecos existentes en el material requieren explicitar las definiciones para una diversidad de densidades y gravedades específicas. Como se muestra en las Figuras 1.16(a) y (b), el volumen bruto que los áridos ocuparán depende del estado de compactación del material. Además, la densidad del material variará dependiendo de cómo se mida el volumen de las partículas individuales. Pueden emplearse diversos tipos de volumen de las partículas, como por ejemplo el volumen total encerrado dentro de los límites de las partículas individuales; el volumen no accesible al agua o al asfalto y el volumen de sólidos, como se muestra en las Figuras 1.16(c), (d), y (e), respectivamente. Estos factores son importantes a la hora de diseñar mezclas de hormigón de cemento portland y de hormigón asfáltico.

1.3.2 Expansión térmica

Prácticamente todos los materiales se expanden a medida que la temperatura aumenta y se contraen a medida que la temperatura desciende. El grado de expansión por unidad de longitud debido a un aumento de temperatura es una constante del material y se expresa mediante el coeficiente de expansión térmica:

$$\alpha_L = \frac{\delta L / \delta T}{L} \tag{1.13}$$

$$\alpha_V = \frac{\delta V / \delta T}{V} \tag{1.14}$$

donde

α_L = coeficiente lineal de expansión térmica.

α_V = coeficiente volumétrico de expansión térmica.
δL = variación de la longitud del elemento.
δT = variación de temperatura.
L = longitud original del elemento.
δV = variación de volumen del elemento.
V = volumen original del elemento.

Para los materiales isotrópicos, $\alpha_V = 3\alpha_L$.

El coeficiente de expansión térmica es muy importante en el diseño de estructuras. Generalmente, las estructuras están compuestas de muchos materiales que se fijan entre sí. Si los coeficientes de expansión térmica son distintos, los materiales se deformarán a velocidades diferentes. El material con la menor expansión restringirá la deformación de los restantes materiales. Este efecto de constricción provoca esfuerzos en los materiales que pueden conducir directamente a la fractura.

También pueden aparecer esfuerzos como resultado de la existencia de un gradiente térmico en la estructura. A medida que la temperatura exterior de la estructura cambia, mientras que la temperatura interior permanece constante, se desarrolla un gradiente térmico. Cuando se restringe la deformación de la estructura, el material se ve sometido a esfuerzos. Este mecanismo provoca, por ejemplo, fracturas en las fachadas de ladrillo de los edificios y, en algunos casos, un colapso de la estructura. Asimismo, puesto que los pavimentos de hormigón tienen su movimiento restringido, pueden aparecer fisuras en el invierno a causa de un descenso de las temperaturas y baches en el verano debido a un aumento de la temperatura. Por esto, se utilizan juntas de unión en los edificios, puentes, pavimentos de hormigón y otro tipos de estructuras, para tener en cuenta este efecto térmico.

Problema de ejemplo 1.5

Una varilla de acero con una longitud de 3 m, un diámetro de 25 mm, un módulo de elasticidad de 207 GPa y un coeficiente lineal de expansión térmica igual a 0,000009 m/m/°C se fija por ambos extremos cuando la temperatura ambiente es de 40°C. Si la temperatura ambiente desciende a 15°C, ¿qué esfuerzos internos aparecerán debido a esta variación de temperatura? ¿Este esfuerzo es de tracción o de compresión? ¿Por qué?

Solución

Si la varilla estuviera fija por un extremo y libre en el otro, se contraería y no aparecería ningún tipo de esfuerzo. En este caso, la variación de longitud podría calcularse aplicando la Ecuación 1.13 como sigue:

$$\delta L = \alpha_L \times \delta T \times L = 0{,}000009 \times (-25) \times 3 = -0{,}000675 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \delta L/L = -0{,}000675/3 = -0{,}000225 \text{ m/m}$$

Puesto que la varilla está fija por ambos extremos, su longitud no puede cambiar. Por tanto, se desarrollará un esfuerzo de tracción en la varilla que tendrá el valor:

$$\sigma = \varepsilon E = 0{,}000225 \times 207000 = 46{,}575 \text{ MPa}$$

El esfuerzo será de tracción; de hecho, la longitud de la varilla a 15°C sin ningún tipo de restricción sería de 2,999325 m y el esfuerzo sería igual a cero. Para restringir la varilla y forzarla a exhibir una longitud mayor hace falta una fuerza de tracción.

1.3.3 Características superficiales

Las propiedades superficiales de los materiales que más interesan a los ingenieros civiles incluyen la corrosión y la degradación, la capacidad del material para resistir la abrasión y el desgaste y la textura superficial.

Corrosión y degradación Casi todos los materiales se deterioran a lo largo de su vida útil. Los mecanismos que contribuyen al deterioro de un material varían dependiendo de las características del material y del entorno. Los materiales cristalinos, como los metales, se deterioran por medio de un proceso de *corrosión* en el que existe una pérdida de material, bien por disolución o por la formación de una película o costra no metálica. Los polímeros, como el asfalto, se deterioran por *degradación*, incluyendo los efectos que los disolventes y la radiación ultravioleta tienen sobre el material.

La protección de los materiales frente a la degradación ambiental es una importante consideración de diseño, especialmente cuando se tienen en cuenta las implicaciones del deterioro y la degradación sobre la vida útil y los costes de mantenimiento de la estructura. La selección de un material debe tener en cuenta tanto la manera en que el material reaccionará a las condiciones ambientales como el coste de prevención de la degradación resultante.

Resistencia a la abrasión y al desgaste Puesto que la mayoría de las estructuras de ingeniería civil son estáticas, la resistencia a la abrasión o al desgaste tiene una menor importancia que en otros campos de la ingeniería. Por ejemplo, los ingenieros mecánicos deben preocuparse por el desgaste de los distintos componentes a la hora de diseñar una máquina. Esto no quiere decir que la resistencia al desgaste pueda ignorarse por completo en la ingeniería civil; los pavimentos deben diseñarse para ser capaces de resistir el desgaste y la acción de pulido provocados por las ruedas de los vehículos, para así proporcionar una adecuada resistencia al derrape en caso de frenada o de giro. La resistencia a la abrasión y al desgaste es, por tanto, una propiedad importante de los áridos utilizados en los pavimentos.

Textura superficial La textura superficial de algunos materiales y estructuras tiene importancia para los ingenieros civiles. Por ejemplo, en el hormigón de cemento portland hace falta que las partículas de áridos tengan una textura suave para facilitar el tratamiento durante la mezcla y la colocación. Por el contrario, en las mezclas de hormigón asfáltico se necesitan áridos de textura rugosa para proporcionar una capa estable de pavimento que resista la deformación cuando se aplique una carga. Asimismo, es preciso que exista un cierto grado de textura superficial en el pavimento para proporcionar una adecuada resistencia de fricción e impedir el derrape de los vehículos cuando el pavimento esté mojado.

1.4 Producción y construcción

Incluso si un material está bien adaptado a una aplicación específica, determinadas consideraciones relativas a la producción y construcción pueden impedir la selección de ese material. Entre las consideraciones de producción se incluyen la disponibilidad del material y la capacidad para fabricarlo en las formas deseadas y según las especificaciones requeridas. Las consideraciones de construcción hacen referencia a todos los factores relacionados con la capacidad de fabricar y erigir la estructura en su lugar final. Uno de los factores principales es la disponibilidad de mano de obra adecuadamente formada. Por ejemplo, en algunas ciudades, se emplea hormigón de alta resistencia para los rascacielos, mientras que en otras se prefiere emplear como material el acero. Obviamente, para los edificios de gran altura puede emplearse tanto hormigón como acero. Las preferencias regionales en favor de uno u otro material se van desarrollando a medida que los ingenieros de esa región concreta se sienten cómodos y confiados al realizar diseños con uno de los materiales y a medida que los constructores responden aportando mano de obra bien formada y equipos especializados.

1.5 Características estéticas

Las características estéticas de un material hacen referencia a la apariencia del mismo. Generalmente, estas características son responsabilidad del arquitecto. Sin embargo, el ingeniero civil es responsable de colaborar con el arquitecto para garantizar que las características estéticas sean compatibles con los requisitos estructurales. Durante la construcción de muchas obras públicas, un cierto porcentaje de la inversión va dirigido a los aspectos artísticos. La colaboración entre el ingeniero civil y el arquitecto es siempre muy recomendable, y esa colaboración suele tener como resultado un incremento del valor de la estructura (véase la Figura 1.17).

En muchos casos, la mezcla de capacidades de diseño artístico y técnico hace que el proyecto sea más aceptable para la comunidad donde vaya a construirse. De hecho, a menudo es más difícil lidiar con las opiniones políticas que con los problemas técnicos de diseño. Por tanto, los ingenieros deben comprender que hay otros muchos factores, además de las necesidades técnicas, que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar los materiales y llevar a cabo diseños de obra pública.

1.6 Variabilidad de los materiales

Es fundamental tener en cuenta que los materiales para ingeniería son inherentemente variables. Por ejemplo, las propiedades del acero varían dependiendo de la composi-



FIGURA 1.17 Ejemplo de colaboración entre el artista y el ingeniero en un proyecto de ingeniería: Academia de las Fuerzas Aéreas de Colorado Springs, Colorado (Estados Unidos).

ción química y del método de fabricación. Las propiedades del hormigón cambiarán dependiendo del tipo y cantidad de cemento, del tipo de árido, del contenido de aire, del grado de asentamiento, del método de curado, etc. Las propiedades del hormigón asfáltico variarán dependiendo de la cantidad y tipo de aglomerante, de las propiedades y gradación del árido, del grado de compactación y de la edad del material. Las propiedades de la madera difieren dependiendo de la especie de árbol, del método de corte y del grado de humedad. Algunos materiales son más homogéneos que otros, dependiendo de su naturaleza y del método de fabricación. Por ejemplo, la variabilidad de la resistencia de fluencia de un tipo de acero es menor que la variabilidad de la resistencia de compresión de un lote de hormigón. Por tanto, la variabilidad es un factor importante a la hora de definir la calidad de los materiales para ingeniería civil.

Cuando se someten a prueba los materiales de un lote concreto, la variabilidad observada es el efecto acumulado de tres tipos de variación: la variabilidad inherente del material, la variación provocada por el método de muestreo y la variación asociada con la forma de realizar las pruebas. Al igual que los materiales tienen una variabilidad inherente, los procedimientos de muestreo y los métodos de prueba pueden producir resultados variables. Frecuentemente, los estadísticos denominan *error* a las variaciones asociadas con los procesos de muestreo y de prueba. Sin embargo, esto no indica que el muestreo o la prueba se realizara incorrectamente. Cuando se identifica un procedimiento incorrecto, el término correcto para describir el fenómeno es *equivocación*. El objetivo del programa de muestreo y de prueba es minimizar las variaciones de esos dos

procesos, de modo que se puedan identificar las verdaderas características estadísticas del material.

Los conceptos de precisión y exactitud son fundamentales para comprender la variabilidad. La *precisión* hace referencia a la variabilidad de una serie de medidas repetidas, en condiciones cuidadosamente controladas. La *exactitud* es la conformidad de los resultados con el valor real o la ausencia de sesgo. El *sesgo* es una tendencia de un valor estimado a desviarse en una u otra dirección con respecto al valor real. En otras palabras, el sesgo es un error sistemático, que se traduce en una diferencia entre el valor de prueba y el valor real. Una analogía simple de la relación existente entre los conceptos de exactitud y precisión sería la diana mostrada en la Figura 1.18. Cuando todos los tiros se concentran en un lugar alejado del centro, eso significa una buena precisión y una mala exactitud (sesgo) [Figura 1.18(a)]. Cuando los tiros están dispersos alrededor del centro, eso indica una mala precisión y una buena exactitud [Figura 1.18(b)]. Por último, se obtendrán una buena precisión y una buena exactitud si todos los tiros se concentran cerca del centro [Figura 1.18(c)] (Burati y Hughes, 1990). Muchos métodos de prueba estandarizados, como los recomendados por la ASTM (*American Society for Testing and Materials*, Sociedad americana de pruebas y materiales) y la AASHTO (*American Association State Highway and Transportation Officials,* Asociación americana de inspectores de transporte y autopistas estatales), contienen enunciados sobre la precisión y el sesgo. Estos enunciados proporcionan los límites de variabilidad aceptables para los resultados de pruebas. Normalmente, a los laboratorios se les que requiere que demuestren su competencia en el campo de las pruebas y puedan ser certificados por el AMRL (*American Material Reference Laboratory*, Laboratorio americano de referencia para materiales).[1]

1.6.1 Muestreo

Normalmente, se toman *muestras* de un *lote* o una *población*, dado que no es práctico ni posible probar el lote completo. Probando un número suficiente de muestras, es

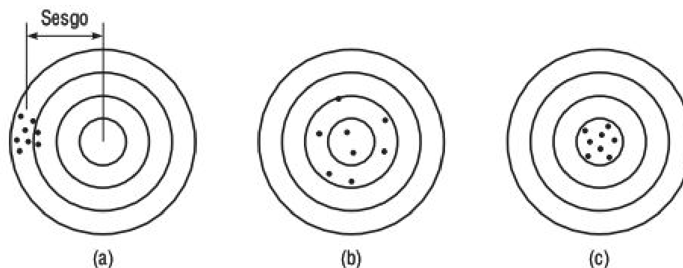


FIGURA 1.18 Exactitud de las medidas: (a) precisa pero no exacta (b) exacta pero no precisa y (c) precisa y exacta.

[1] *Nota:* los organismos oficiales correspondientes para Europa son ISO (International Standarization Organization) y CEN (Comité Europeo de Normalización). En España puede recurrir a AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).

posible estimar las propiedades del lote completo. Para que las muestras sean válidas deben ser seleccionadas de forma *aleatoria*. El muestreo aleatorio requiere que todos los elementos de la población tengan una probabilidad igual de ser seleccionados. Otro concepto importante en el proceso de muestreo es que la muestra debe ser *representativa* del lote completo. Por ejemplo, a la hora de muestrear un montón de árido, es importante tomar muestras de la partes superior, central e inferior del montón y combinarlas, dado que es probable que los diferentes puntos del montón tengan tamaños de partículas diferentes. El tamaño de la muestra necesaria para cuantificar las características de una población dependerá de la variabilidad de las propiedades del material y del nivel de confianza requerido durante la evaluación.

Para describir las propiedades de los materiales se utilizan parámetros estadísticos. Los parámetros estadísticos más comúnmente utilizados son la media y la desviación típica. La *media aritmética* es simplemente el promedio de los resultados de prueba de todos los elementos probados. Es una medida de la tendencia central de la población. La *desviación típica* es una medida del grado de dispersión de los resultados. Las ecuaciones para la media $\bar{x}$ y la desviación típica s de una muestra son:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{1.15}$$

$$s = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{1/2} \tag{1.16}$$

donde n es el tamaño de la muestra. La media y la desviación típica de una serie de muestras aleatorias son estimaciones de la media y la desviación típica, respectivamente, de la población.

1.6.2 Distribución normal

La distribución normal es una función simétrica alrededor de la media, como se muestra en la Figura 1.19. La distribución normal describe muchos tipos de poblaciones que

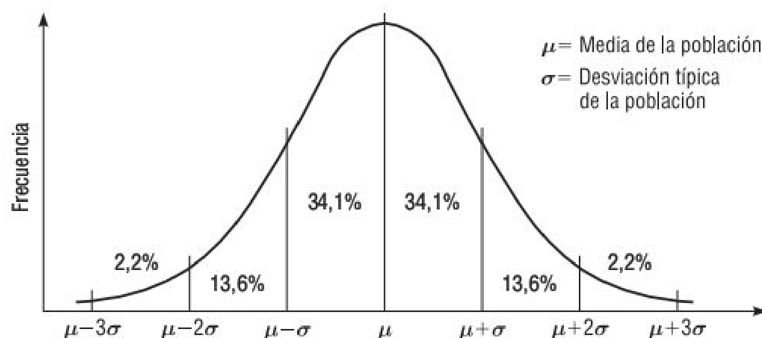


FIGURA 1.19 Distribución normal.

aparecen en la naturaleza, en la investigación y en la industria, incluyendo las propiedades de los materiales. El área bajo la curva comprendida entre dos valores representa la probabilidad de que se produzca un cierto suceso de interés. Al expresar los resultados en términos de la media y la desviación típica, es posible determinar las probabilidades de que un suceso se produzca. Por ejemplo, la probabilidad de que tenga lugar un suceso entre la media y ±1 desviación típica es del 68,3%, entre la media y ±2 desviaciones típicas es del 95,5% y entre la media y ±3 desviaciones típicas es del 99,7%. Si un ingeniero de materiales prueba 20 elementos de hormigón y determina que la media es 22 MPa y la desviación típica es 3 MPa, las estadísticas muestran que el 95,5% del tiempo, la verdadera media de la población estará comprendida en el rango 22 ± (2 × 3), es decir de 16 a 28 MPa.

1.6.3 Diagramas de control

Los diagramas de control se emplean en la fabricación y en las aplicaciones de construcción para verificar que un proceso está controlado. Es importante resaltar que los diagramas de control no mantienen el proceso bajo control, sino que simplemente proporcionan un mecanismo de advertencia visual que permite identificar cuándo un contratista o proveedor de materiales debe buscar posibles problemas del proceso. Los diagramas de control presentan muchas ventajas (Burati y Hughes, 1990), tales como:

- Detectar anticipadamente los problemas.
- Reducir la variabilidad.
- Determinar las capacidades del proceso.
- Reducir el coste de ajuste de los precios.
- Reducir la frecuencia de las inspecciones.
- Proporcionar una base para la modificación de los límites de las especificaciones.
- Proporcionar un registro permanente de la calidad.
- Proporcionar una base para la aceptación de los resultados.
- Motivar una preocupación por la calidad.

Existen muchos tipos de diagramas de control, siendo el más simple de ellos el que refleja los resultados en orden cronológico. Por ejemplo, la Figura 1.20 muestra un diagrama de control de la resistencia a la compresión de una serie de elementos de hormigón probados en una hormigonera. El diagrama de control también puede mostrar los límites de tolerancia de la especificación, de modo que el operador pueda identificar si los resultados de las pruebas están fuera de las especificaciones. Aunque este tipo de diagrama de control resulta útil, se basa en un tamaño muestral unitario y no tiene en cuenta, por tanto, la variabilidad existente entre las muestras.

Pueden crearse diagramas de control estadístico, como el diagrama de control de valores promedio (diagrama X-barra) y el diagrama de control de rangos (diagrama R) en los que se vayan situando cronológicamente los valores promedio o los rangos de los resultados de las pruebas. La Figura 1.21(a) muestra un diagrama de control para la media móvil de tres pruebas consecutivas de resistencia a la compresión. Por ejemplo,

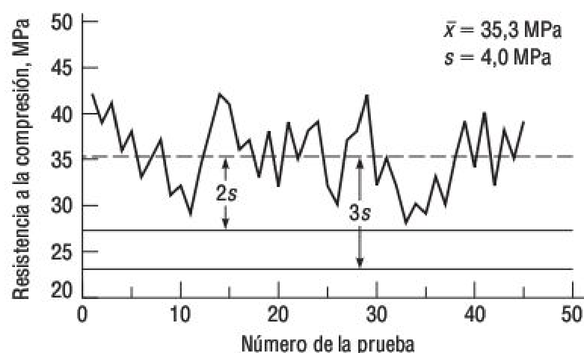
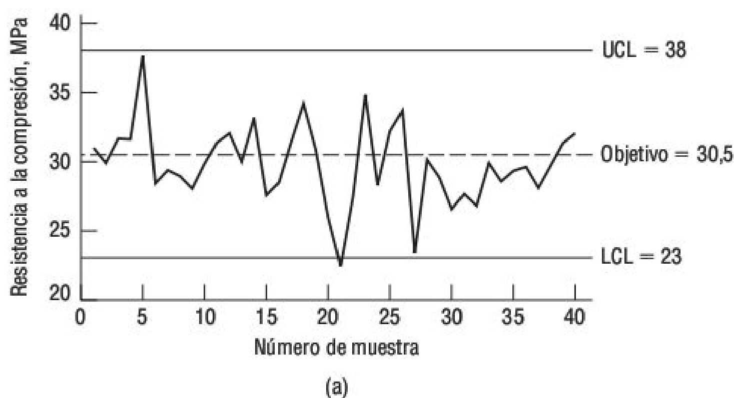


FIGURA 1.20 Diagrama de control para la resistencia a la compresión de elementos de hormigón.



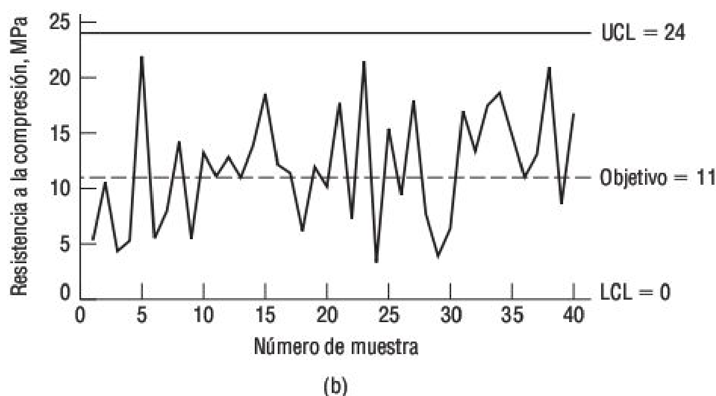


FIGURA 1.21 Diagrama de control estadístico: (a) diagrama X-barra y (b) diagrama R. UCL indica el límite de control superior; LCL indica el límite de control inferior.

el primer punto representa la media de las primeras tres primeras pruebas, el segundo punto representa la media de las pruebas dos a cuatro, y así sucesivamente. La Figura 1.21(b) ilustra un diagrama de control para el rango móvil de tres pruebas consecutivas de resistencia a la compresión. El elemento fundamental en el uso de diagramas de

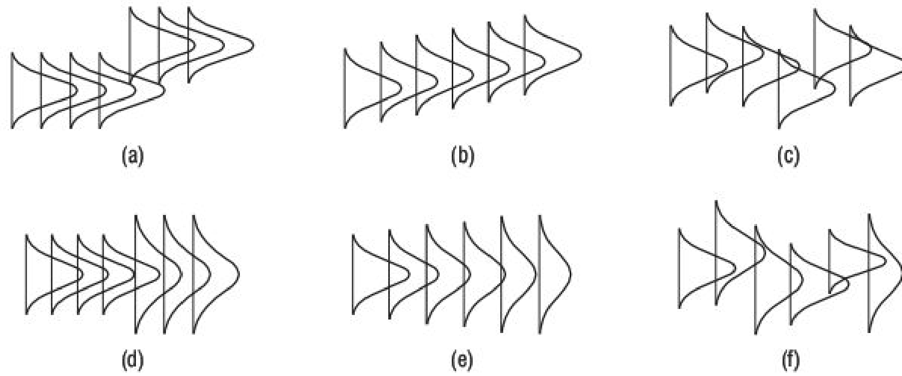


FIGURA 1.22 Tendencias posibles de las medias y rangos en los diagramas de control estadístico: (a) cambio súbito en la media, (b) cambio gradual en la media, (c) cambio irregular en la media, (d) cambio súbito en el rango, (e) cambio gradual en el rango y (f) cambio irregular en el rango.

control estadístico es la adecuada designación de los *límites de control* establecidos para un proceso dado. Estos límites de control no tienen porqué coincidir necesariamente con la tolerancia o los límites de la especificación, y pueden fijarse empleando funciones probabilísticas. Por ejemplo, el diagrama de control para valores promedio descansa en el hecho de que, para una distribución normal, prácticamente todos los valores caen dentro de ±3 desviaciones típicas respecto de la media. Por tanto, podemos establecer límites de control entre ±3 desviaciones típicas con respecto a esa media. En ocasiones, los límites de advertencia para identificar problemas potenciales se establecen en ±2 desviaciones típicas de la media.

La observación de la tendencia de las medias y los rangos en los diagramas de control estadístico puede ayudar a eliminar problemas de producción y a reducir la variabilidad. La Figura 1.22 ilustra posibles tendencias de las medias y rangos en los diagramas de control estadístico (Burati y Hughes, 1990). La Figura 1.22(a) muestra un cambio súbito sostenido en el valor promedio. Esto podría indicar un cambio de proveedor de los materiales durante el proyecto. Un cambio gradual en la media, como el mostrado en la Figura 1.22(b), podría indicar un cambio progresivo debido al desgaste de una máquina. Un desplazamiento irregular de la media, como se muestra en la Figura 1.22(c), podría deberse a que el operador está realizando ajustes continuos pero innecesarios de los parámetros del proceso. La Figura 1.22(d) ilustra un cambio súbito en el rango, que también podría indicar un cambio de proveedor de material durante el proyecto. La Figura 1.22(e) muestra un aumento gradual del rango, lo que podría deberse al desgaste de una máquina. Por último, la Figura 1.22(f) ilustra un cambio irregular tanto en la media como en el rango, lo que indica que el proceso está funcionando incorrectamente.

1.6.4 Error experimental

Cuando se prueban una serie de elementos en el laboratorio, pueden producirse imprecisiones debido a errores de la máquina o de los operadores humanos. Por ejemplo, la

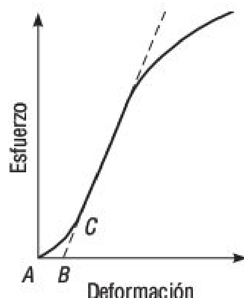


FIGURA 1.23 Corrección de la región inicial en un curva de esfuerzo–deformación.

Figura 1.23 muestra una curva de esfuerzo–deformación en la que aparece una región inicial (AC) que no representa una propiedad del material. Esta región inicial es un artefacto provocado por las holguras y la alineación o asentamiento del elemento. Para poder obtener valores correctos para parámetros tales como el módulo, la deformación y la desviación del punto de fluencia, hay que compensar este artefacto, obteniendo el punto cero corregido en el eje de deformación. Esto se puede hacer prolongando la parte lineal de la curva hacia abajo, hasta que intersecte con el eje de deformación en el punto B. En este caso, el punto B será el punto corregido de deformación cero a partir del cual habrá que medir todas las deformaciones. En el caso de un material que no presente ninguna región lineal, puede llevarse a cabo una corrección similar construyendo una tangente para la pendiente máxima en el punto de inflexión y prolongándola hasta que cruce con el eje de deformación.

1.7 Equipos de medida de laboratorio

Las pruebas de laboratorio permiten medir las propiedades de los materiales. Con frecuencia, los elementos están hechos del material en cuestión y se prueban en el laboratorio con el fin de medir su respuesta a las fuerzas aplicadas o a ciertas condiciones ambientales. Estas pruebas requieren que se midan ciertos parámetros, como el tiempo, la deformación o la fuerza. Algunos de estos parámetros se miden directamente, mientras que otros se miden de forma indirecta relacionando unos parámetros con otros. La longitud y la deformación se pueden medir directamente utilizando dispositivos simples como reglas, galgas y calibres. En otros casos, se realizan medidas indirectas midiendo la tensión eléctrica y relacionándola con la deformación, la fuerza, el esfuerzo o el alargamiento. Como ejemplos de tales dispositivos podemos citar los transformadores diferenciales variables lineales LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), las galgas extensimétricas y las celdas de carga. También hay disponibles equipos de medida de las deformaciones sin contacto que emplean láseres y diversos dispositivos ópticos. Los dispositivos electrónicos de medida pueden conectarse fácilmente a regis-

tradores gráficos, dispositivos de lectura digital o computadoras, en los que los resultados pueden visualizarse y procesarse fácilmente.

Cada dispositivo tiene una cierta *sensibilidad,* que es el valor más pequeño que puede leerse en la escala del mismo. No hay que confundir la sensibilidad con la exactitud o la precisión. El diseño de un equipo de medida puede mejorarse para incrementar su sensibilidad, pero el desgaste, la fricción, el ruido, la deriva y otros factores pueden introducir errores que limiten la exactitud y la precisión del dispositivo.

La exactitud de la medida no puede superar la sensibilidad del equipo de medida. Por ejemplo, si un cronómetro con una sensibilidad de 0,01 segundo se emplea para medir el tiempo, el intervalo más pequeño de tiempo que podrá registrarse será también de 0,01 segundo. La selección del dispositivo de medida y su sensibilidad dependerá de la exactitud de medida requerida. La exactitud requerida, por otro lado, depende del significado y del uso de esa medida. Por ejemplo, a la hora de expresar la distancia de viaje de una ciudad a otra, puede que tenga sentido una exactitud de 1 kilómetro o incluso de 10 kilómetros. Por el contrario, al fabricar un microchip informático, puede ser necesaria una exactitud de una millonésima de metro o incluso más pequeña. En las pruebas de ingeniería, la exactitud de las medidas debe determinarse de antemano, para garantizar un uso adecuado de dichas medidas y, al mismo tiempo, evitar invertir esfuerzo y dinero innecesario durante las pruebas. Muchos métodos de prueba estandarizados como los de ASTM y AASHTO, establecen la sensibilidad de los equipos de medida usados en un determinado experimento. En cualquier caso, hay que tener cuidado para garantizar una adecuada calibración, un correcto conexionado, un adecuado uso y una interpretación correcta de los resultados de las pruebas proporcionados por los distintos equipos de medida.

A continuación se describen brevemente los dispositivos de medida comúnmente utilizados para probar materiales, tales como las galgas, los transformadores LVDT, las galgas extensimétricas, los anillos calibradores y las celdas de carga.

1.7.1 Galgas

Las galgas se utilizan en muchas pruebas de laboratorio para medir la deformación. La galga se conecta a dos puntos entre los que se pretende medir el movimiento relativo. La mayoría de las galgas incluyen dos escalas con dos punteros distintos, como se ilustra en la Figura 1.24. La división más pequeña de la escala mayor determina la sensibilidad del dispositivo y suele mostrarse en la carátula de la galga. Una división del puntero pequeño corresponde a una rotación completa del puntero de mayor tamaño. El rango completo del puntero pequeño determina el rango de medida de la galga. Las galgas utilizadas en pruebas de materiales para ingeniería civil suelen tener sensibilidades que van de 0,1 mm a 0,002 mm. La galga mostrada en la Figura 1.24 tiene una sensibilidad de 0,001 pulgadas y un rango de 1 pulgada. La galga se puede "poner a cero" girando la escala mayor, con el fin de comenzar a leer a partir de la posición actual del puntero.

Las galgas pueden conectarse en distintas configuraciones a diversos accesorios para medir la deformación de una cierta longitud o el movimiento relativo entre dos

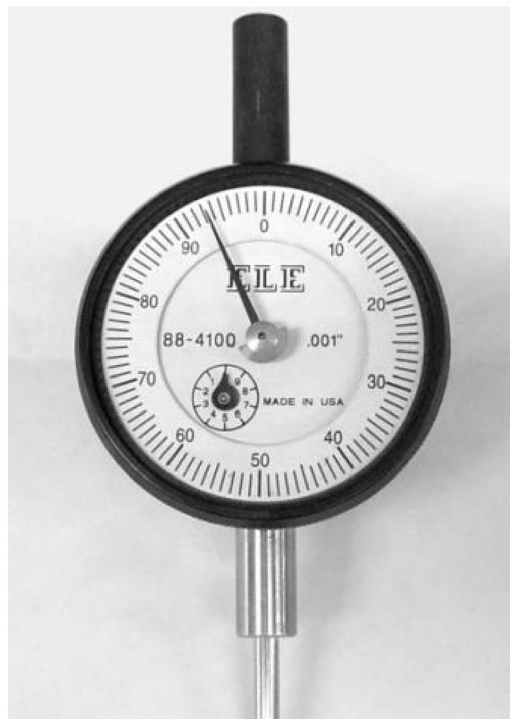


FIGURA 1.24 Galga.

puntos. Por ejemplo, el *extensímetro* mostrado en la Figura 1.25 se utiliza para medir la deformación de la longitud de una barra de metal durante la prueba de tracción. Observe que debido a la configuración del extensímetro mostrado en la figura, la deformación de la barra será la mitad de la lectura indicada por la galga.

1.7.2 Transformador diferencial variable lineal (LVDT)

El transformador (transductor) diferencial variable lineal (LVDT) es un dispositivo electrónico comúnmente utilizado en experimentos de laboratorio para medir pequeños movimientos o deformaciones de elementos. El LVDT está compuesto por una coraza no magnética y un núcleo magnético. La coraza contiene un devanado eléctrico primario y dos secundarios, como se ilustra en la Figura 1.26. Al aplicar una tensión eléctrica al LVDT se obtiene una tensión de salida. Cuando el núcleo está en la posición cero en el centro de la coraza, la tensión de salida es igual a cero. Cuando el núcleo se mueve ligeramente en una dirección, se obtiene una tensión de salida. Al desplazarse el núcleo en la dirección opuesta, la tensión de salida que se genera tiene el signo contrario. La relación entre la posición del núcleo y la tensión de salida es lineal dentro de un cierto rango determinado por el fabricante. Si se conoce esta relación, puede determinarse el desplazamiento midiendo la tensión de salida con un voltímetro u otro dispositivo sensor. Los LVDT pueden medir tanto movimientos estáticos como dinámicos.

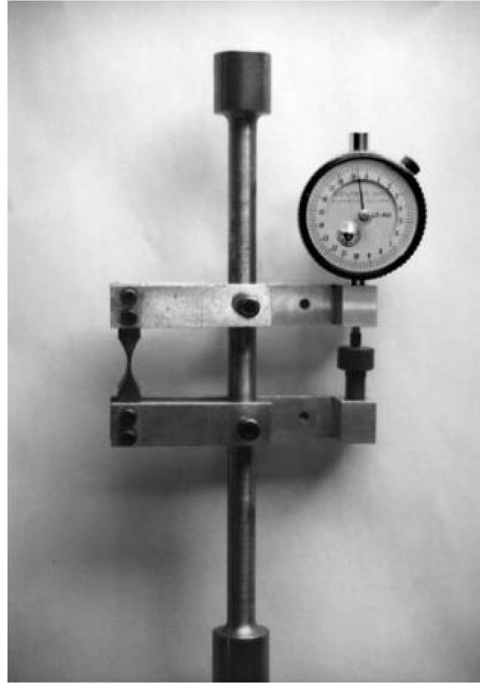


FIGURA 1.25 Extensímetro con galga.

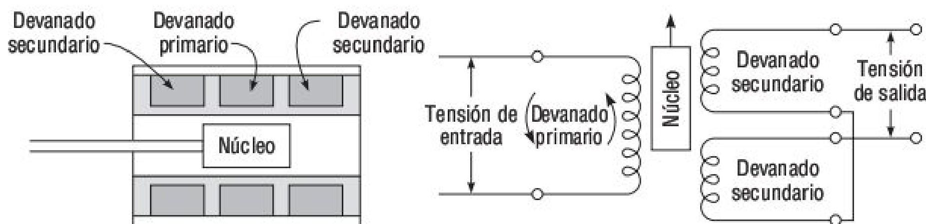


FIGURA 1.26 Circuito LVDT.

Los LVDT varían ampliamente en cuanto a sensibilidad y rango. La sensibilidad de los LDTV comerciales varía en el rango comprendido entre 0,003 y 0,25 V/mm (0,08 y 6,3 V/pulgada) de desplazamiento por voltio de excitación. La excitación normal suministrada al devanado primario de 3 Vac con una frecuencia en el rango comprendido entre 50 Hz y 10 kHz. Si se utilizan 3 V, los LVDT más sensibles proporcionan una salida de 18,9 mV/mm (Dally y Riley, 1991). En general, los LVDT muy sensibles tienen rangos lineales pequeños, mientras que los LVDT con rangos lineales grandes son menos sensibles. La sensibilidad y el rango de linealidad necesarios dependerán de la precisión y de la cantidad de desplazamiento requeridos para la medida.

Antes de usarlo, el LVDT debe calibrarse para determinar la relación entre la tensión de salida y el desplazamiento. Para calibrar el LDVT, se utiliza un dispositivo de cali-

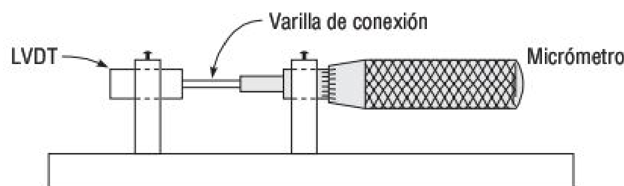


FIGURA 1.27 Dispositivo de calibración de un LVDT.

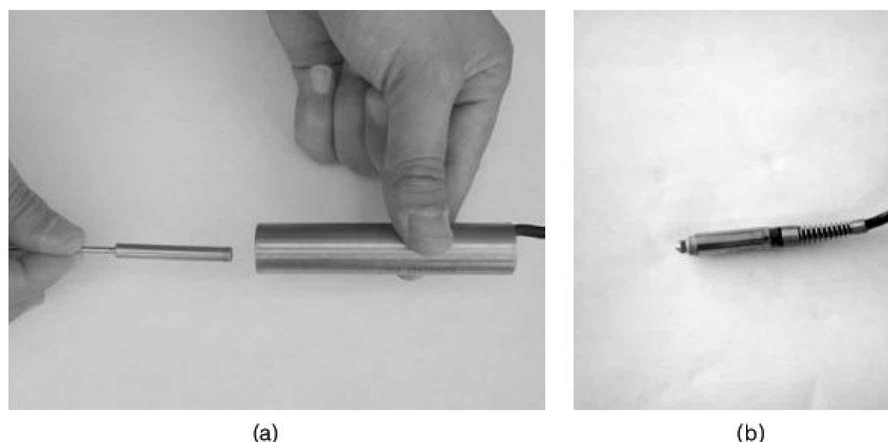


FIGURA 1.28 Tipos de LVDT: (a) sin resorte (el núcleo y la varilla de conexión están fuera de la coraza) y (b) con resorte (el núcleo y la varilla de conexión están dentro de la coraza).

bración compuesto de un micrómetro, un voltímetro y un soporte, como se muestra en la Figura 1.27.

La coraza y el núcleo del LVDT pueden estar separados o conectarse mediante un resorte (Figura 1.28). Cuando se utiliza el primero de los dos tipos, se conecta una varilla de conexión roscada no magnética al núcleo usado para conectar el LVDT al objeto medido. En cualquiera de los dos casos, para medir el movimiento relativo entre dos puntos, el núcleo se conecta a un punto y la coraza se conecta a otro. Cuando la distancia entre los dos puntos varía, se modifica la posición del núcleo con respecto a la coraza, alterando proporcionalmente la tensión de salida. La Figura 1.29 muestra un extensímetro con un LVDT que puede usarse para medir la deformación de una varilla metálica durante las pruebas de tracción.

1.7.3 Galgas extensimétricas

Las galgas extensimétricas se utilizan para medir pequeñas deformaciones de elementos de una determinada longitud. Existen varios tipos de galgas extensimétricas, pero el tipo más común es la galga extensimétrica eléctrica, que está compuesta por una lámi-

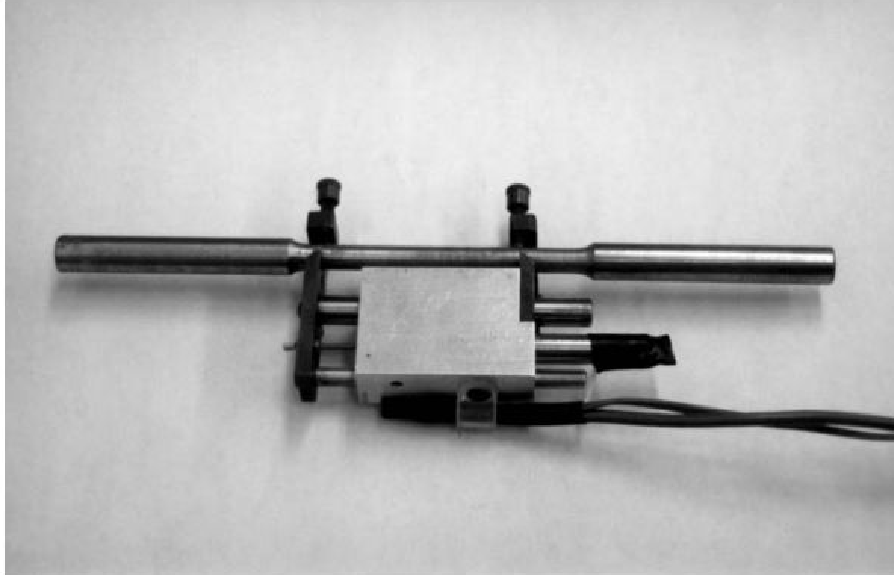


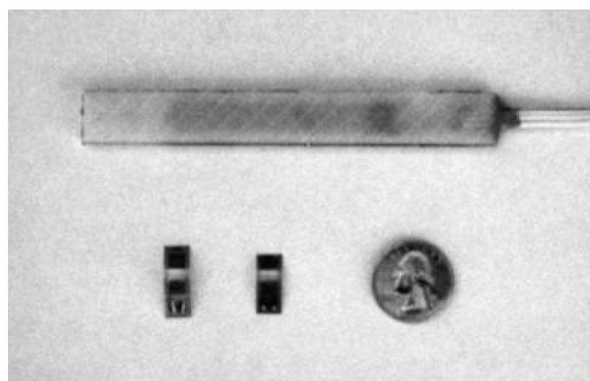
FIGURA 1.29 Extensímetro con un LVDT.

na o hilo arrollado a una fina base de plástico o papel (Figura 1.30). Con esta disposición, se hace pasar una corriente eléctrica a través del elemento (lámina o hilo). Cuando el elemento se deforma, su resistencia eléctrica varía proporcionalmente. La galga extensimétrica se fija mediante un adhesivo a la superficie en la que se desea medir la deformación. A medida que la superficie se deforma, también lo hace la galga extensimétrica y, en consecuencia, la resistencia varía. Puesto que la variación de resistencia es muy pequeña, no puede utilizarse un óhmetro ordinario. Por tanto, se emplean circuitos eléctricos especiales, como el puente de Wheatstone para detectar la variación de resistencia (Dally y Riley, 1991).

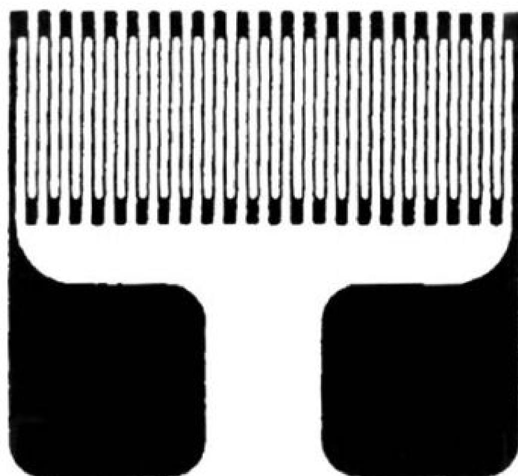
Las galgas extensimétricas se fabrican en diferentes tamaños, pero las más adecuadas tienen una longitud de galga de entre 5 mm y 15 mm (1/4 de pulgada y 1/2 pulgada). También pueden fabricarse galgas extensimétricas de mayor tamaño para ciertas aplicaciones.

Una galga de alambre se construye realizando un arrollamiento de hilo metálico muy fino (de unos 0,025 mm de diámetro). Las galgas de lámina se fabrican grabando un cierto patrón en una lámina metálica delgada (de unos 0,0025 mm de espesor). Las láminas e hilos se fabrican en una gran diversidad de formas, tamaños y tipos, y se fijan a una base de plástico o papel. Cuando la galga extensimétrica se conecta al objeto, se coloca con la lámina o hilo hacia fuera. Las galgas de lámina y de plástico se utilizan más comúnmente que las de alambre.

Al utilizar galgas extensimétricas, es importante fijar firmemente la galga y el elemento que se va a medir. La superficie debe limpiarse y prepararse cuidadosamente y el adhesivo debe de aplicarse y dejarse secar apropiadamente. El adhesivo tiene que ser compatible con el material que se va a probar.



(a)



(b)

FIGURA 1.30 Galgas extensimétricas: (a) galgas extensimétricas con diferentes tamaños y (b) galga extensimétrica de lámina típica.

1.7.4 Anillo de calibración

Los anillos de calibración se utilizan para medir fuerzas en muchas pruebas de laboratorio. El anillo de calibración está formado por un anillo de acero con una galga conectada, como se muestra en la Figura 1.31. Al aplicar una fuerza al anillo de calibración, este se deforma, pudiéndose medir esa deformación mediante la galga. Si la relación entre la fuerza y la lectura de la galga se conoce, el anillo de calibración puede emplearse para medir la fuerza aplicada. Por tanto, el anillo de calibración se suministra con una relación de calibración, bien en la forma de una ecuación lineal, bien en la forma de una tabla; esa relación permite al usuario determinar la relación de la fuerza a partir de la medida de deformación del anillo. Para evitar cualquier daño, es importante no aplicar al anillo de calibración una fuerza superior a la capacidad especifi-

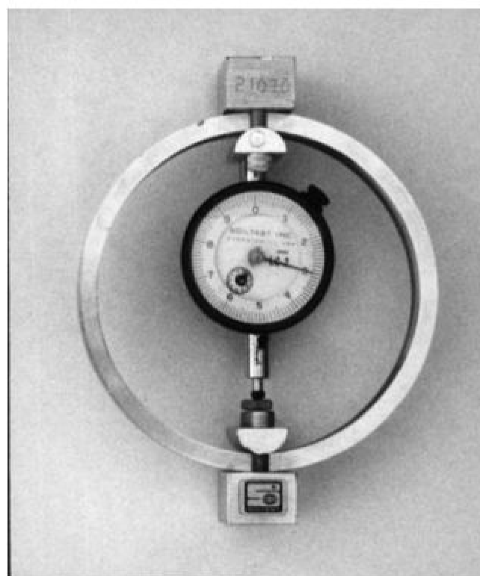


FIGURA 1.31 Anillo de calibración.

cada por el fabricante. Asimismo, es aconsejable calibrar periódicamente el anillo de calibración, para garantizar que las medidas sean correctas.

1.7.5 Celda de carga

La celda de carga es un dispositivo electrónico de medida de fuerzas utilizado en muchas pruebas de laboratorio. En este dispositivo, se conectan galgas extensimétricas a un elemento dentro de la celda de carga, sometiéndose a ese elemento a una flexión o a una carga axial. Al aplicar una tensión eléctrica a la celda de carga, se obtiene una tensión de salida. Si se conoce la relación entre la fuerza y la tensión de salida, es posible determinar la fuerza midiendo la tensión.

Las celdas de carga se fabrican en diferentes formas y con distintas capacidades de carga. La Figura 1.32(a) ilustra una celda de carga de tracción fabricada montando cuatro galgas extensimétricas en la región central de un elemento sometido a tensión. La Figura 1.32(b) muestra una celda de carga en forma de S en la que las galgas extensimétricas se fijan en la parte central y se calibran para medir la fuerza aplicada en las partes superior e inferior de la celda de carga. La Figura 1.32(c) muestra una galga extensimétrica de diafragma que se fija a la superficie interior de un contenedor que mide la cantidad de presión aplicada a la celda de carga.

Las celdas de carga deben calibrarse periódicamente utilizando cargas de calibración o una máquina de carga calibrada. Hay que tener cuidado de no sobrecargar la celda de carga. Si la carga aplicada a la celda excede de la capacidad recomendada por el fabricante, puede producirse una deformación permanente, con lo que la celda será ya inutilizable.

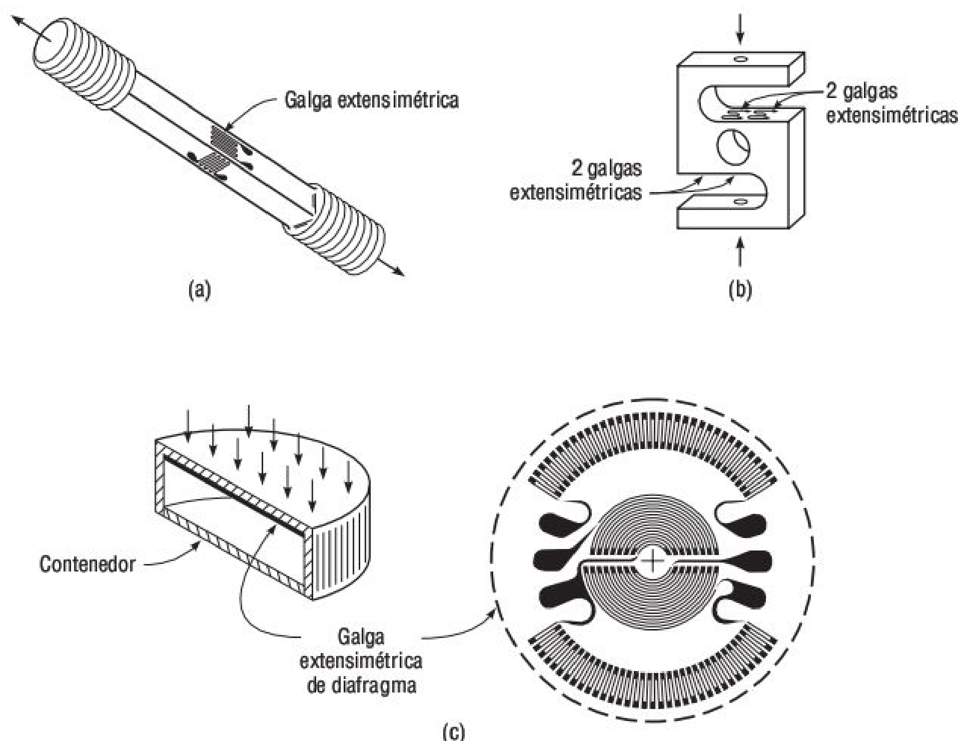


FIGURA 1.32 Celdas de carga: (a) galgas extensimétricas en una varilla sometida a tensión, (b) galgas extensimétricas en un elemento en forma de S y (c) galga extensimétrica de diafragma en un contenedor.

RESUMEN

Los ingenieros civiles y de la construcción están implicados en la selección de los materiales de construcción con las propiedades mecánicas necesarias para cada proyecto. Además, ese proceso de selección debe ponderar otros factores además de la capacidad de los materiales para soportar cargas. Los aspectos económicos, de producción, construcción, mantenimiento y estéticos deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar un material.

Últimamente, en todos los campos de la ingeniería se ha producido un enorme crecimiento del uso de materiales de alto rendimiento. Por ejemplo, en el sector de la automoción, la aplicación de cerámicas y plásticos se está incrementando, a medida que los fabricantes intentan conseguir unas mejores prestaciones, un funcionamiento más económico y un mayor grado de seguridad, reduciendo al mismo tiempo las emisiones. De forma similar, los ingenieros civiles y de la construcción están buscando continuamente materiales con mejores cualidades y un mejor rendimiento. Actualmente, los materiales compuestos avanzados, los geotextiles y diversos productos sintéticos compiten

con los materiales tradicionales de la ingeniería civil. Aunque se continuarán empleando durante algún tiempo los materiales tradicionales como el acero, el hormigón, la madera y el asfalto, las mejoras de estos materiales se producirán modificando la estructura molecular de los mismos y empleando modificadores para mejorar su comportamiento. Como ejemplos de tales mejoras podemos citar el hormigón reforzado con fibra, el hormigón y el asfalto modificados mediante polímeros, los aglomerantes asfálticos con baja susceptibilidad a la temperatura, el hormigón de alta resistencia inicial, los superplastificantes, los refuerzos de acero recubiertos de epoxy, los refuerzos sintéticos para varillas, los compuestos de hormigón de curación rápida, los geocompuestos prefabricados de drenaje, los áridos ligeros, los materiales de construcción ignífugos y las junturas resistentes a terremotos. Los ingenieros civiles también están reciclando materiales antiguos, en un esfuerzo para ahorrar en los costes de los materiales, reducir el consumo de energía y mejorar el medio ambiente.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

1.1 Cite tres ejemplos de aplicaciones con carga estática y otros tres de aplicaciones con carga dinámica.

1.2 Un material tiene el comportamiento esfuerzo–deformación mostrado en la Figura P1.2. ¿Cuál es la resistencia del material en el punto de ruptura? ¿Cuál es la tenacidad de este material?

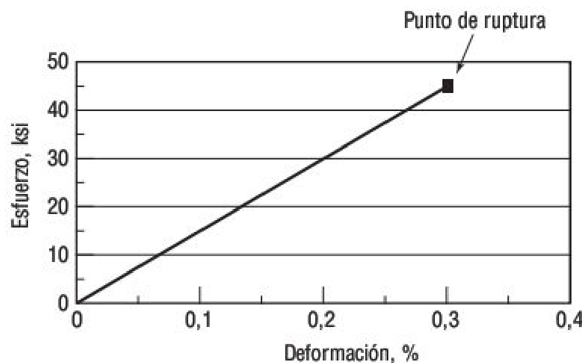


FIGURA P1.2

1.3 Se aplica una carga de tracción de 220 kN a una barra metálica cilíndrica, que tiene un diámetro de 16 mm y una longitud de 50 mm. Con esta carga, la barra se deforma elásticamente de forma que la longitud aumenta a 50,1686 mm y el diá-

metro disminuye a 15,9875 mm. Determine el módulo de elasticidad y la relación de Poisson para este metal.

1.4 Un cilindro con un diámetro de 6,0 pulgadas y una longitud de 12,0 pulgadas se somete a una carga de compresión de 138,4 kips. El módulo de elasticidad del elemento es de 6500 ksi y la relación de Poisson es igual a 0,4. Calcule la longitud y el diámetro finales de este elemento, en dichas condiciones de carga.

1.5 Un bloque rectangular de aluminio de dimensiones 30 mm × 60 mm × 90 mm se coloca en una cámara de presión y se somete a una presión de 100 MPa. Si el módulo de elasticidad es de 70 GPa y la relación de Poisson es igual a 0,333, ¿cuál será la reducción en el lado más largo del bloque suponiendo que el material permanece dentro de la región elástica? ¿Cuál será la reducción de volumen experimentada por el bloque?

1.6 Un material tiene una relación esfuerzo–deformación que puede aproximarse mediante la ecuación

$$\varepsilon = 0{,}3 \times 10^{-16} \times \sigma^3$$

donde el esfuerzo está expresado en psi. Calcule el módulo de secante y el módulo de tangente para un nivel de esfuerzo de 50.000 psi.

1.7 Muestre en una gráfica la relación esfuerzo–deformación durante la carga y la descarga para los siguientes dos tipos de materiales:
a. Material elástico no lineal.
b. Material elastoplástico con endurecimiento por deformación.

1.8 El bloque rectangular mostrado en la Figura P1.8 se somete a una tensión dentro del rango elástico. El incremento de longitud de a es 2×10^{-3} pulgadas y la contracción de b es de $3{,}25 \times 10^{-4}$ pulgadas. Si las longitudes originales de a y b eran 2 pulgadas y 1 pulgada, respectivamente, ¿cuál es la relación de Poisson para el material de este elemento?

1.9 Una varilla cilíndrica con una longitud de 380 mm y un diámetro de 10 mm se somete a una carga de tracción. La varilla no debe experimentar una deformación plástica ni un incremento de longitud mayor que 0,9 mm cuando se aplique una carga de 24,5 kN. ¿Cuál de los cuatro materiales enumerados en la siguiente tabla serían posibles candidatos? Razone su respuesta.

Material	Módulo de elasticidad GPa	Resistencia de fluencia, MPa	Resistencia a la tracción, MPa
Acero	207	448	551
Aleación de aluminio	70	255	420
Aleación de bronce	101	345	420
Cobre	110	248	289

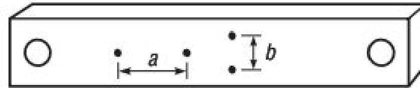


FIGURA P1.8

1.10 La relación esfuerzo–deformación mostrada en la Figura P1.10 se obtuvo durante las pruebas de tracción de un elemento de aleación de aluminio.

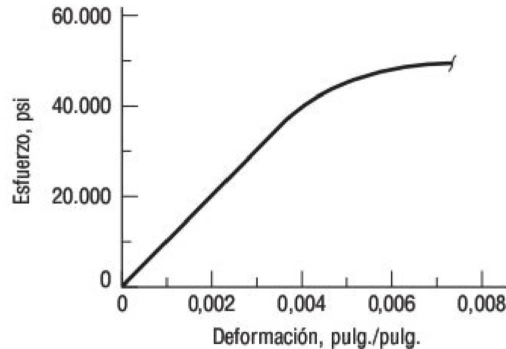


FIGURA P1.10

Determine lo siguiente:

a. Módulo de Young en la parte lineal.
b. Módulo de tangente para un nivel de esfuerzo de 45.000 psi
c. Esfuerzo de fluencia utilizando un desvío de 0,002 para la deformación.
d. Si el esfuerzo de fluencia del apartado (c) se considera igual al esfuerzo de fallo, ¿cuál es el esfuerzo máximo de trabajo que puede aplicarse a este material si se utiliza un factor de seguridad de 1,5?

1.11 Una prueba de tensión realizada en un elemento de metal para fracturarlo nos da la relación esfuerzo–deformación mostrada en la Figura P1.11. Determine gráficamente lo siguiente (indique las unidades y el método de trabajo utilizado):

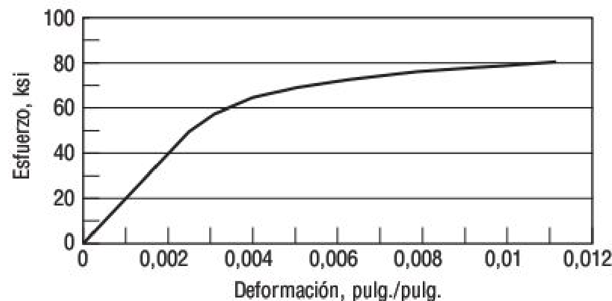


FIGURA P1.11

a. Módulo de elasticidad en la parte lineal.
b. Esfuerzo de fluencia para un desvío de deformación de 0,002 pulg./pulg.
c. Esfuerzo de fluencia para una extensión de deformación de 0,005 pulg./pulg.
d. Módulo de secante para un nivel de esfuerzo de 62 ksi.
e. Módulo de tangente para un nivel de esfuerzo de 65 ksi.

1.12 Utilice el Problema 1.11 para determinar gráficamente los siguientes datos:
a. Módulo de resiliencia.
b. Tenacidad.
Consejo: la tenacidad (u_t) se puede determinar calculando el área comprendida bajo la curva de esfuerzo–deformación:

$$u_t = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \, d\varepsilon$$

donde ε_f es la deformación en el punto de fractura. La integral anterior puede aproximarse numéricamente utilizando una técnica de integración trapezoidal:

$$u_t = \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})$$

c. Si el elemento se carga a 40 ksi únicamente y la deformación lateral medida fuera igual a −0,00057 pulgadas/pulgada, ¿cuál será la relación de Poisson de este metal?
d. Si el elemento se carga a 70 ksi únicamente y luego se descarga, ¿cuál será la deformación permanente?

1.13 La Figura P1.13 muestra las relaciones esfuerzo–deformación de los metales A y B durante una serie de pruebas de tracción hasta fractura. Determine lo siguiente para los dos metales (detalle todos los cálculos y las unidades):

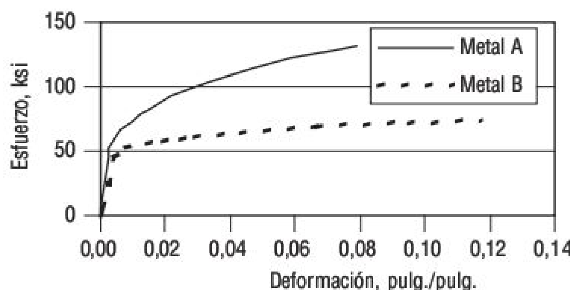


FIGURA P1.13

a. Límite de proporcionalidad.
b. Esfuerzo de fluencia para un desvío de deformación de 0,002 pulg./pulg.
c. Resistencia máxima.

d. Módulo de resiliencia.
e. Tenacidad.
f. ¿Qué metal es más dúctil? ¿Por qué?

1.14 Una aleación de bronce tiene una resistencia de fluencia de 280 MPa, una resistencia a la tracción de 390 MPa y un módulo de elasticidad de 105 GPa. Un elemento cilíndrico de esta aleación de 12,7 mm de diámetro y 250 mm de longitud se somete a una tracción y se determina que se alarga 7,6 mm. Teniendo en cuenta la información proporcionada, ¿es posible calcular la magnitud de la carga necesaria para producir este cambio de longitud? En caso afirmativo, calcule la carga. En caso contrario, explique la respuesta.

1.15 La Figura P1.15 muestra respuestas idealizadas de tipo (i) elástica–perfectamente plástica y (ii) elastoplástica con endurecimiento por deformación. ¿Qué esfuerzo hace falta en cada caso para tener
a. una deformación de 0,001?
b. una deformación de 0,004?

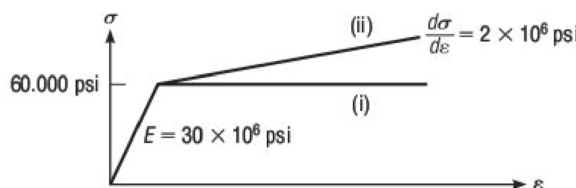


FIGURA P1.15

1.16 Un material elastoplástico con endurecimiento por deformación presenta la relación esfuerzo–deformación mostrada en la Figura P1.16. El punto de fluencia corresponde a un esfuerzo de 600 MPa y a una deformación de 0,003 m/m.
a. Si se somete a una barra de este material a un esfuerzo de 650 MPa y luego se elimina la carga, ¿cuál será la deformación permanente?

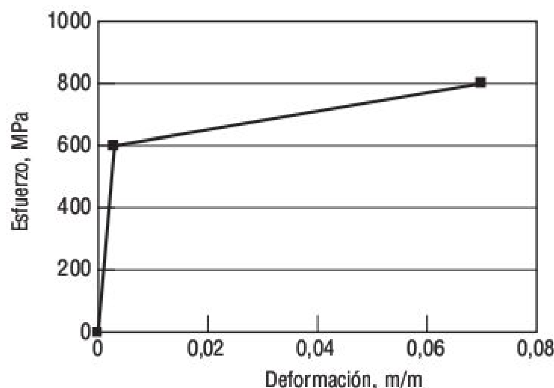


FIGURA P1.16

b. ¿Cuál es el incremento porcentual de la resistencia de fluencia que se obtiene mediante el endurecimiento por deformación mostrado en el apartado (a)?
c. ¿Cuál es el incremento porcentual de la resistencia que se obtiene mediante el endurecimiento por deformación mostrado en el apartado (a)?
d. Después del endurecimiento por deformación, si se somete al material a un esfuerzo de 625 MPa, ¿qué deformación se obtiene? ¿Esta deformación es elástica, permanente o una combinación de ambas cosas?

1.17 Un elemento cilíndrico de hormigón asfáltico con un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 6 pulgadas se somete a una carga estática de compresión axial de 150 libras durante 1 hora, después lo cual se elimina la carga. La prueba se realiza a una temperatura de 38°C (100°F). La altura del elemento se mide en diferentes instantes durante la carga y la descarga a lo largo de dos horas obteniéndose los siguientes resultados:

Tiempo, minutos	Altura del elemento, pulgadas	Tiempo, minutos	Altura del elemento, pulgadas
0	6,0000	60,01	5,9772
0,01	5,9916	62	5,9807
2	5,9870	65	5,9841
5	5,9833	70	5,9879
10	5,9796	80	5,9926
20	5,9753	90	5,9942
30	5,9725	100	5,9954
40	5,9708	110	5,9959
50	5,9696	120	5,9964
60	5,9688		

a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje dos gráficos separados que muestren la variación del esfuerzo y de la deformación en función del tiempo.
b. ¿Qué valor tiene la deformación elástica?
c. ¿Qué valor tiene la deformación permanente al final del experimento?
d. ¿Cómo se denomina el fenómeno de cambio de altura del elemento durante la carga estática? ¿Cómo se denomina el fenómeno de cambio de altura del elemento durante la descarga?

1.18 Dibuje un diagrama del modelo de Maxwell y etiquete todos los componentes. Dibuje una gráfica que muestre el desplazamiento en función del tiempo cuando el modelo se somete a una fuerza constante durante un cierto periodo de tiempo t y luego se libera. Comente por qué el modelo responde de esa forma.

1.19 Calcule la relación de respuesta para cada uno de los modelos mostrados en la Figura P1.19, suponiendo que la fuerza F es constante y se aplica de forma instantánea.



FIGURA P1.19

1.20 Enumere cuatro modos de fallo de los materiales. Describa ejemplos típicos de cada modo.

1.21 Una varilla de metal con un diámetro de 10 mm se somete a una carga de tracción repetitiva. El material de la varilla tiene una resistencia a la tracción de 290 MPa y un comportamiento de fallo por fatiga como el que se muestra en la Figura 1.14. ¿Cuántas repeticiones de la carga pueden aplicarse a esta varilla antes de que falle si la magnitud de la carga es (a) 5 kN y (b) 11 kN?

1.22 ¿Qué es el factor de seguridad? ¿Con qué criterios se selecciona su valor?

1.23 Indique los valores típicos de la gravedad específica de tres materiales comúnmente empleados en la construcción.

1.24 Defina el coeficiente de expansión térmica. ¿Cuál es la relación entre los coeficientes lineal y volumétrico de expansión térmica?

1.25 Una varilla de acero, que es libre de moverse, tiene una longitud de 200 mm y un diámetro de 20 mm a una temperatura de 15°C. Si se calienta la varilla uniformemente hasta 115°C, determine la longitud y el diámetro de esta varilla con una precisión de micras para la nueva temperatura, si el coeficiente de expansión térmica del acero es $12{,}5 \times 10^{-6}$ m/m/°C. ¿Se producirá algún nivel de esfuerzo en la varilla a 115°C?

1.26 En el Problema 1.25, si se fija firmemente la varilla a dos paredes inamovibles no conductoras que están a una temperatura de 15°C y luego se caliente la varilla uniformemente hasta 115°C, ¿cuál será su longitud a 115°C? Si el módulo de elasticidad del acero es de 207 GPa, ¿cuál será el esfuerzo inducido en la varilla? ¿Es este esfuerzo de tracción o de compresión?

1.27 Una placa de acero de longitud igual a 4 metros con una sección transversal rectangular (10 mm $\times$ 50 mm) descansa sobre una superficie libre de rozamiento y bajo el sol. La temperatura de la placa se mide resultando ser de 40°C. A continuación, la placa se lleva a una habitación fría y se la deja sobre una superficie sin rozamiento. Después de varias horas, se mide la temperatura de la placa y resulta ser igual a 5°C. El acero tiene un módulo de elasticidad igual a 200.000 MPa y un coeficiente de expansión térmica de $1{,}1 \times 10^{-5}$ m/m/°C.

a. ¿Cuánto se contraerá la placa?

b. ¿Qué carga de tracción es necesaria para devolver la longitud a su valor original de 4 metros?
c. ¿Cuál es la deformación longitudinal en estas condiciones de carga?

1.28 Estime la resistencia a la tracción requerida para impedir la aparición de fisuras en un material de tipo hormigón que se moldea para formar una barra de 50 pulgadas de longitud y que se restringe completamente en cada uno de los extremos frente a posibles movimientos axiales. El hormigón se moldea y se cura inicialmente a una temperatura de 100°F y después se enfría a una temperatura de 0°F. suponga que el módulo de elasticidad es de 5 millones psi y que el coeficiente térmico es igual a 5×10^{-6} pulgada/pulgada/°F.

1.29 Cite dos ejemplos en los que la corrosión juegue un papel importante a la hora de seleccionar el material que se empleará en una estructura.

1.30 Explique brevemente la variabilidad de los materiales de construcción. Defina los términos exactitud y precisión cuando se realizan pruebas sobre los materiales.

1.31 Para evaluar las propiedades de un material, se toma una serie de muestras y se prueban. ¿Cuáles son los dos factores más importantes que habrá que satisfacer a la hora de tomar las muestras? Indique cómo se pueden satisfacer estos factores.

1.32 Un proveedor afirma que la resistencia media de compresión para una mezcla de hormigón es de 32,4 MPa (4700 psi) y que tiene una desviación típica de 2,8 MPa (400 psi). Si rompemos 16 cilindros y obtenemos una resistencia media de compresión de 30,3 MPa (4.400 psi), ¿podemos creernos la afirmación del proveedor? ¿Por qué? (*Consejo:* utilice una prueba *t*-estadística.)

1.33 Durante la construcción de la capa superficial de un pavimento de asfalto, se toman dos muestras cada día para medir el contenido de asfalto de la mezcla, con el fin de verificar que se encuentra dentro de los límites especificados. El valor especificado es de un 5,5% con una tolerancia del ±0,4%. Durante las pruebas, se recopilaron los datos mostrados en la tabla de la página siguiente acerca del contenido de asfalto.

a. Calcule la media, la desviación típica y el coeficiente de variación de los datos.
b. Utilizando un programa de hoja de cálculo, cree un diagrama de control para estos datos en el que se muestren el valor especificado y los límites superior e inferior de la especificación. ¿Se encuentran los datos del contenido de asfalto dentro de los límites especificados? Comente las tendencias que detecte y proporcione posibles razones para las mismas.

1.34 Explique brevemente el concepto en que se basa cada uno de los siguientes dispositivos de medida:

a. LVDT
b. Galga extensimétrica.
c. Anillo calibrador
d. Celda de carga

1.35 Utilizando la galga mostrada en la Figura P1.35, determine

Fecha	Contenido de asfalto, %	Fecha	Contenido de asfalto, %
5 de Mayo	5,7	12 de mayo	5,3
5 de mayo	5,8	12 de mayo	5,6
6 de mayo	5,3	13 de mayo	5,8
6 de mayo	5,4	13 de mayo	5,1
7 de mayo	5,7	14 de mayo	5,8
7 de mayo	5,7	14 de mayo	5,9
8 de mayo	5,6	15 de mayo	5,1
8 de mayo	5,8	15 de mayo	6,2
9 de mayo	5,4	16 de mayo	5,2
9 de mayo	5,5	16 de mayo	4,8

a. La exactitud.
b. La sensibilidad.
c. El rango, asumiendo que el puntero pequeño se mueve una división por cada vuelta completa del puntero más largo.
d. ¿Cuál de los elementos anteriores puede mejorarse mediante una calibración?

1.36 Las medidas deben redondearse a las unidades 1000, 100, 10, 1, 0,1; 0,01; 0,001, etc., más próximas, dependiendo de la variabilidad y del uso que se pretenda dar a las medidas. Utilizando el sentido común, ¿cómo daría las siguientes medidas?
a. Deformación de un elemento de acero durante las pruebas de tracción (pulgadas).
b. Resistencia a la tracción del acero (psi).
c. Módulo de elasticidad del aluminio (MPa).
d. Peso de los áridos en una prueba de análisis granulométrico (gramos).

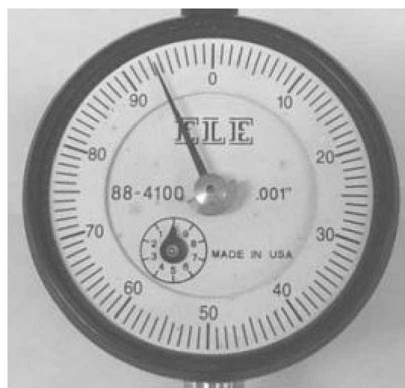


FIGURA P1.35

e. Resistencia a la compresión de un hormigón de cemento portland (psi).
f. Contenido de humedad de una unidad concreta de mampostería (porcentaje).
g. Contenido de asfalto en una mezcla de asfalto en caliente (porcentaje).
h. Gravedad específica de la madera.
i. Distancia entre las ciudades de Nueva York y Los Ángeles (millas o kilómetros).
j. Dimensiones de un microchip de una computadora (mm).

1.37 Durante la calibración de un LVDT se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla adjunta. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación entre la lectura del micrómetro y la tensión eléctrica. ¿Cuál es el rango lineal del LVDT? Determine el factor de calibración del LVDT obteniendo la línea de ajuste óptimo de los datos dentro del rango lineal.

Lectura del micrómetro, pulgadas	Tensión (voltios)	Lectura del micrómetro, pulgadas	Tensión (voltios)
0,342	−10,120	0,472	0,985
0,352	−10,120	0,482	1,990
0,362	−10,121	0,492	3,023
0,372	−9,134	0,502	4,035
0,382	−8,131	0,512	5,071
0,392	−7,111	0,522	6,098
0,402	−6,100	0,532	7,115
0,412	−5,108	0,542	8,143
0,422	−4,089	0,552	9,144
0,432	−3,097	0,562	10,157
0,442	−2,059	0,572	10,156
0,452	−1,053	0,582	10,156
0,462	0		

1.8 Referencias

Ashby, M. F. y D. R. H. Jones. *Engineering Materials: An Introduction to Their Properties and Applications*. Nueva York: Pergamon Press, 1980.
Burati, J. L. y C. S. Hughes. *Highway Materials Engineering, Module I: Materials Control and Acceptance—Quality Assurance*. Publication No. FHWA-HI-90-004. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1990.

Callister, W. D., Jr. *Materials Science and Engineering—An Introduction*. Sexta edición. Nueva York: John Wiley and Sons, 2003.
Dally. J. W. y W. F. Riley. *Experimental Stress Analysis*. Tercera edición. Nueva York: McGraw-Hill, 1991.
Flinn, R. A. y P. K. Trojan. *Engineering Materials and Their Applications*. Tercera edición. Boston, MA: Houghton Mifflin, 1986.
Mehta, P. K. y P. J. M. Monteiro. *Concrete Structure, Properties, and Materials*. Segunda edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.
Polowski, N. H. y E. J. Ripling. *Strength and Structure of Engineering Materials*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1966.
Popov, E. P. *Introduction to Mechanics of Solids*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1968.
Richart, F. E., Jr., J. R. Hall, Jr. y R. D. Woods. *Vibrations of Soils and Foundations*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1970.

2

NATURALEZA DE LOS MATERIALES

En gran medida, el comportamiento de los materiales queda determinado por la estructura y los enlaces de los átomos que forman ese material. Conocer el tipo de enlace y la estructura de los materiales a nivel molecular nos permite comprender su comportamiento. Este capítulo presenta una amplia panorámica de conceptos fundamentales que son esenciales para entender estos comportamientos. El capítulo hace un repaso de los tipos básicos de enlaces y, a continuación, basándose en el tipo de enlace, clasifica los materiales como metálicos, cerámicos o amorfos. También se presenta la naturaleza general de cada una de estas clases de materiales.

2.1 Conceptos básicos sobre materiales

Los átomos son los componentes básicos de todos los materiales. A lo largo de este texto, consideraremos que los átomos están formados por tres partículas subatómicas: los *protones*, los *neutrones* y los *electrones*. Los protones y los neutrones se encuentran en el centro del átomo, mientras que los electrones se mueven alrededor del núcleo siguiendo determinadas trayectorias u órbitas. El *número atómico* es el número de protones que hay en el núcleo del átomo. La *masa atómica* de un átomo es el número de protones más el número de neutrones que hay en el centro del átomo. Un *elemento* es un átomo o un grupo de átomos con el mismo número atómico. Los *isótopos* son elementos con un número diferente de neutrones en el núcleo.

2.1.1 Configuración electrónica

El comportamiento de los electrones de un átomo controla, en gran medida, las características de un elemento. Un átomo eléctricamente neutro (o completo) tiene el mismo número de electrones que de protones. Sin embargo, los átomos pueden liberar o atraer electrones con el fin de alcanzar una configuración más estable. Los electrones se mueven alrededor del núcleo siguiendo trayectorias orbitales, u órbitas. La distancia entre

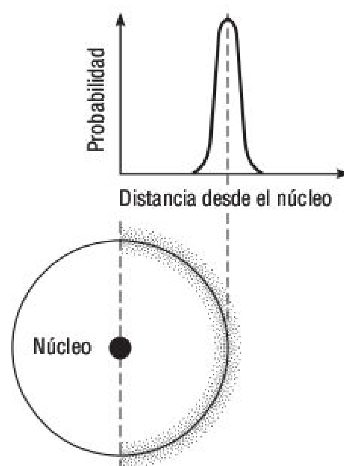


FIGURA 2.1 Trayectoria orbital de electrones ideales.

los electrones y el núcleo no es fija sino que se puede describir mejor como una variable aleatoria con una cierta probabilidad de distribución asociada, como se muestra en la Figura 2.1.

Cada orbital o *capa* sólo puede contener un número fijo de electrones. El número máximo de electrones que puede haber en una órbita es igual a $2n^2$, donde n es el número cuántico principal de la capa. El orbital de los electrones se define mediante cuatro parámetros: el número cuántico principal de la capa o designación de capa, la designación de subcapa, el número de estados energéticos de la subcapa y el espín del electrón. En la Tabla 2.1 se indica el número de electrones que puede haber en cada una de las capas y subcapas.

TABLA 2.1 Número de estados electrónicos disponibles en algunas capas y subcapas de electrones.

Número cuántico principal	Designación de capa	Subcapa	Número de estados	Número de electrones por subcapa	Número de electrones por capa
1	K	s	1	2	2
2	L	s	1	2	8
		p	3	6	
3	M	s	1	2	18
		p	3	6	
		d	5	10	
4	N	s	1	2	32
		p	3	6	
		d	5	10	
		f	7	14	

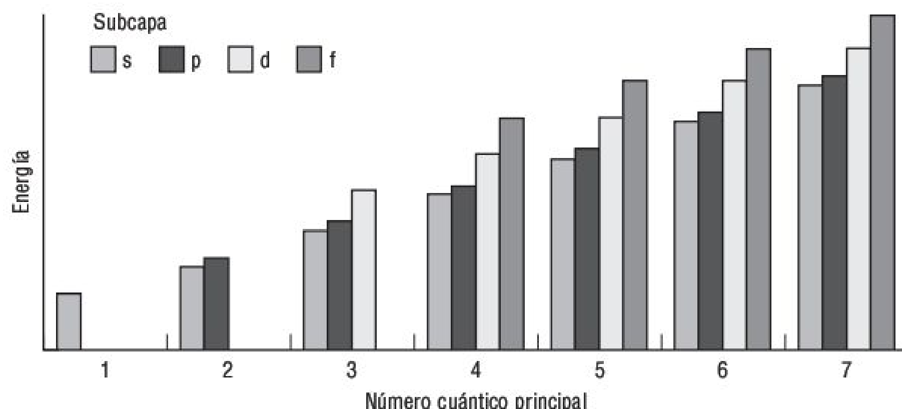


FIGURA 2.2 Niveles de energía de los electrones en las distintas capas y subcapas.

El nivel de energía de un electrón depende de la capa y la subcapa en la que se encuentre, como se muestra en la Figura 2.2 (Callister 2003). Los electrones siempre intentan rellenar, en primer lugar, las posiciones con el menor nivel de energía. Como se puede ver en la Figura 2.2, para una subcapa determinada, cuanto mayor sea el número cuántico principal, mayor será el nivel de energía (por ejemplo, el nivel de energía de la subcapa 1s es menor que el de la subcapa 2s). Dentro de una capa, el nivel de energía se incrementa con las subcapas: la subcapa f tiene un estado de energía mayor que la subcapa d, y así sucesivamente. Entre las capas existe un solapamiento de energía: la subcapa 4s tiene un estado de energía menor que la subcapa 3d. La configuración electrónica o estructura del átomo describe la manera en que los electrones se disponen en las capas y subcapas. El convenio utilizado para indicar la ubicación de las capas dentro del átomo consiste en indicar el número cuántico seguido de la designación de la subcapa y del número de electrones de la subcapa expresado como un exponente. Esta secuencia se repite para cada una de las subcapas que contenga electrones. En la Tabla 2.2 se proporcionan algunos ejemplos.

Los electrones de la capa completamente llena más externa son los *electrones de valencia*. Estos son los electrones que participan en la formación de los enlaces primarios entre átomos. Los ocho electrones necesarios para rellenar las subcapas s y p son especialmente importantes. Si estas subcapas están completamente llenas, los átomos son muy estables y prácticamente incapaces de reaccionar, como es el caso de los gases nobles neón y argón. En muchos casos, los átomos liberarán, atraerán o compartirán electrones para completar estas subcapas y alcanzar una configuración estable. El calcio y el hierro son ejemplos de átomos con electrones que llenan la subcapa 4s, mientras que la subcapa 3d está incompleta o vacía, como cabría esperar de la Figura 2.2. El cobre demuestra que existen excepciones a la regla de distribución de energías. Uno esperaría que el cobre tuviera dos electrones en la subcapa 4s, dejando nueve en la subcapa 3d. Sin embargo, tiene diez electrones en la subcapa 3d y sólo uno en la subcapa 4s. En el cromo existe una disparidad similar. Observe que el hierro tiene dos electrones en la

TABLA 2.2 Ejemplos de configuraciones electrónicas.

Elemento	Número atómico	Configuración electrónica
Hidrógeno	1	$1s^1$
Helio	2	$1s^2$
Carbono	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
Neón	10	$1s^2 2s^2 2p^6$
Sodio	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Aluminio	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Silicio	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Azufre	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Argón	18	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
Calcio	20	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$
Cromo	24	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$
Hierro	26	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
Cobre	29	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$

subcapa 4s; por tanto, tiene dos electrones más de los que necesita para adoptar una configuración estable. Estos dos electrones son liberados para formar moléculas de hierro. El aluminio también es una excepción, ya que tiene un exceso de tres electrones.

2.1.2 Enlaces

A medida que se acercan dos átomos, se desarrollan fuerzas tanto de atracción como de repulsión. Los efectos de estas fuerzas son aditivos, como se muestra en la Figura 2.3, de modo que una vez que los átomos están lo suficientemente cerca como para interaccionar alcanzarán un punto en el que las fuerzas de atracción y de repulsión se compensarán, llegándose al equilibrio. En esta situación, hace falta energía tanto para acercar los átomos entre sí (*compresión*) como para separarlos (*tracción*). La distancia a la que la fuerza neta es cero corresponde al nivel mínimo de energía y se denomina *distancia de equilibrio*. La energía mínima está representada por un signo negativo. El valor negativo más alto se define como la energía de enlace. La energía de enlace puede calcularse a partir de las ecuaciones que definen las fuerzas de atracción y de repulsión. Basándose en la resistencia de los enlaces, puede estimarse la resistencia teórica de un material. Sin embargo, esta resistencia teórica sobreestima enormemente la resistencia real debido a los fallos en la estructura molecular (Van Vlack 1964, 1989).

La energía del enlace depende del mecanismo molecular que mantiene unidos a los átomos. Hay dos categorías básicas de enlaces: primarios y secundarios. Los *enlaces primarios* se forman cuando los átomos interactúan de modo que se modifica el número de electrones en sus capas externas, con el fin de conseguir una estructura electrónica

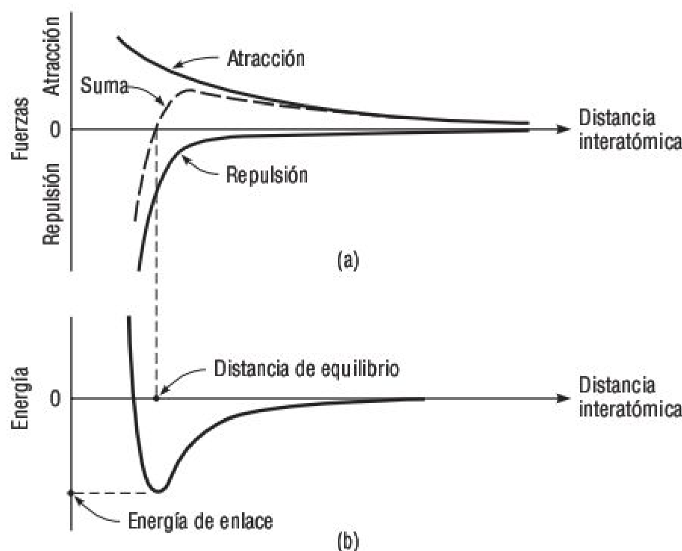


FIGURA 2.3 (a) Fuerzas y (b) energías de atracción y de repulsión entre los átomos. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso)

estable y no reactiva, similar a la de un gas noble. Los *enlaces secundarios* se forman cuando la disposición física de los átomos en la molécula da como resultado una carga eléctrica no equilibrada. Uno de los lados será positivo y el otro negativo. Las moléculas se unen entonces mediante fuerzas electrostáticas.

Enlaces primarios Se definen tres tipos de enlaces primarios basándose en la forma en que los electrones de valencia interactúan con otros átomos:

1. Enlaces iónicos: transferencia de electrones de un átomo elemental a otro (véase la Figura 2.4)
2. Enlaces covalentes: compartición de electrones entre átomos específicos (Figura 2.5)
3. Enlaces metálicos: compartición en masa de electrones entre varios átomos (véase la Figura 2.6)

Los enlaces iónicos son el resultado de la cesión de electrones por parte de un átomo a otros átomos que aceptan los electrones. Cada uno de los elementos alcanza

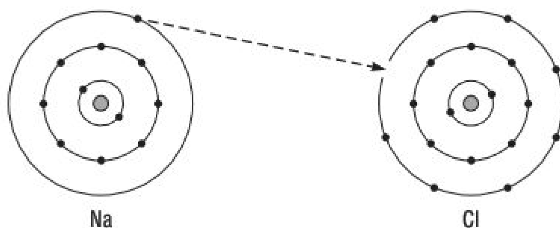


FIGURA 2.4 Enlace iónico. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

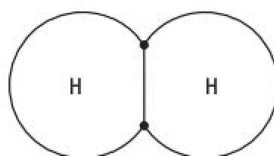


FIGURA 2.5 Enlace covalente. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

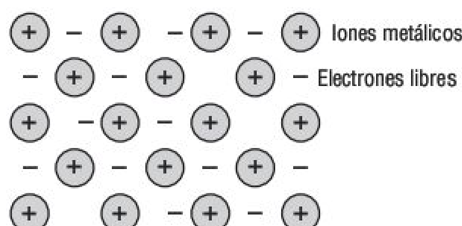


FIGURA 2.6 Enlace metálico. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

una configuración electrónica estable en las subcapas externas s y p. Todos los átomos serán iones, ya que tienen carga eléctrica. Cuando un átomo libera un electrón, el átomo pasa a estar positivamente cargado y el átomo que recibe el electrón pasa a tener carga negativa. Un ion con carga positiva se denomina *catión*, mientras que otro con carga negativa se denomina *anión*. El enlace iónico se produce como resultado de la atracción electrostática de los átomos cargados positiva y negativamente. Puesto que estos enlaces se basan en la transferencia de electrones, no tienen naturaleza direccional.

Los enlaces covalentes se forman cuando dos átomos similares comparten electrones de la subcapa externa. Las órbitas atómicas de los átomos se solapan y un electrón de cada átomo puede intercambiarse con un electrón de su átomo asociado. Si consideramos el electrón compartido como asociado con ambos átomos, cada uno de los átomos tendrán llenas las subcapas s y p, y será, por tanto, un átomo estable. Puesto que las trayectorias orbitales de los átomos deben solaparse para que el enlace covalente se pueda formar, estos enlaces son altamente direccionales. En materiales como el diamante, los enlaces covalentes son muy fuertes; sin embargo, la estructura en forma de cadena de carbono de los polímeros también se crea mediante enlaces covalentes, y estos elementos presentan un amplio rango de energías de enlace. El número de enlaces que se forman dependerá del número de electrones de valencia. Un átomo con N electrones en la capa de valencia puede enlazarse únicamente con $8N$ vecinos compartiendo electrones con ellos. Cuando el número de electrones N es 7, los átomos se unen en parejas. Cuando N es igual a 6, como en el caso del azufre, pueden formarse grandes cadenas dado que cada átomo puede enlazarse con dos vecinos. Cuando N es igual a 5, se puede desarrollar una estructura en capas. Si hay 4 electrones de valencia, pueden formarse enlaces covalentes tridimensionales (por ejemplo, la estructura del carbono en los diamantes) (Jastrzebski, 1987). La cadena de calcio-silicio del hormigón de cemento portland está basada en enlaces covalentes.

La mayoría de los enlaces interatómicos son parcialmente iónicos y parcialmente covalentes, y hay muy pocos compuestos que tengan enlaces puramente covalentes o iónicos. En general, el grado de cada tipo de enlace dependerá de las posiciones relativas de los elementos en la tabla periódica. Cuanto mayor sea la separación, más enlaces iónicos se forman. Puesto que los electrones de los enlaces iónicos y covalentes están fijos en átomos específicos, estos materiales tienen buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico.

Los enlaces metálicos aparecen como resultado de que los átomos metálicos tengan electrones débilmente acoplados en la subcapa s externa. Cuando una serie de átomos metálicos similares interactúan, los electrones externos se liberan y quedan libres para flotar entre los átomos. En consecuencia, los átomos son iones que están eléctricamente equilibrados por los electrones libres. En otras palabras, los electrones libres se desasocian del átomo original y no quedan asociados a ningún otro átomo. Los enlaces metálicos no son direccionales y la distancia entre los iones dependerá de las características físicas de los átomos. Los átomos tienden a agruparse para formar estructuras simples de alta densidad, igual que sucedería si agitáramos un conjunto de bolas en una caja y luego las dejamos asentarse. El fácil movimiento de los electrones es el responsable de la alta conductividad eléctrica y térmica de los metales.

Enlaces secundarios Los enlaces secundarios son mucho más débiles que los primarios, pero tienen una gran importancia en la formación de enlaces entre materiales poliméricos. Estos enlaces surgen debido a una atracción de dipolo entre átomos no cargados. A medida que los electrones se desplazan alrededor del núcleo, en cualquier instante, la carga está distribuida de forma no simétrica respecto del núcleo. Por tanto, en cada instante determinado, un lado del átomo tendrá una carga negativa y el otro una carga positiva. Los enlaces secundarios se forman gracias a la atracción electrostática de los dipolos atómicos. Estas interacciones tipo dipolo se producen entre dipolos inducidos o entre moléculas polares que exhiban dipolos permanentes; ambos tipos de interacción se clasifican como *fuerzas de van der Waals*. Sin embargo, el hidrógeno sólo tiene un protón y un electrón; por tanto, tiende a formar una molécula polar cuando se enlaza con otro átomo. El enlace electrostático formado a causa del enlace de hidrógeno

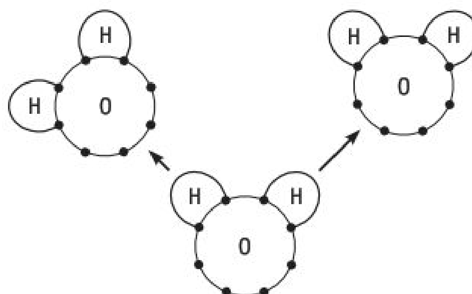


FIGURA 2.7 Enlace secundario: puente de hidrógeno. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

generalmente es más fuerte que las fuerzas de van der Waals, por lo que el enlace de hidrógeno, mostrado en la Figura 2.7, es una forma especial de enlace secundario.

2.1.3 Clasificación de los materiales según el tipo de enlace

Basándonos en el tipo predominante de enlace que los átomos de un material pueden formar, los materiales se clasifican de forma general como metales, sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos. Estos materiales tienen, predominantemente, enlaces metálicos; covalentes e iónicos; y covalentes, respectivamente. Los sólidos con cada uno de estos tipos de enlaces presentan características muy distintivas. Los metales y sólidos inorgánicos suelen presentar una *estructura cristalina*, que es una disposición o patrón de los átomos. Por su parte, los sólidos orgánicos suelen tener una estructura molecular aleatoria. A continuación se enumeran los principales materiales de cada categoría que se emplean en ingeniería civil:

Metálicos
- acero
- hierro
- aluminio

Sólidos inorgánicos
- hormigón de cemento portland
- bloques de ladrillo y escoria
- vidrio
- áridos (productos rocosos)

Sólidos orgánicos
- asfalto
- plásticos
- madera

2.2 Materiales metálicos

La definición química de metal es que es un elemento con uno, dos o tres electrones de valencia. Estos elementos se unen mediante enlaces metálicos para formar una masa. Debido a la naturaleza de los enlaces metálicos, los metales tienen una estructura muy regular y bien definida. Puesto que los enlaces metálicos no son direccionales, los átomos son libres de empaquetarse para adoptar una configuración densa. El patrón geométrico tridimensional regular de los átomos de un metal se denomina *celda unitaria*. La unión repetida de celdas unitarias forma una retícula espacial del material. Sin embargo, en una masa de material, solo puede conseguirse una estructura perfecta en condiciones cuidadosamente controladas. Generalmente, los sólidos metálicos se forman enfriando una masa de material fundido. Y, a medida que el material se enfría, los átomos vibran, lo que puede hacer que un átomo ocupe el espacio de dos creando un de-

fecto en la estructura reticular. Además, durante el proceso de enfriamiento, los cristales crecen simultáneamente a partir de varios núcleos. A medida que el material continúa enfriándose, estos cristales en crecimiento topan unos con otros formándose una frontera entre las distintas vetas. Esto produce fallas o planos de deslizamiento en la estructura, que tienen una importante influencia en el comportamiento y las características del material. Además, raramente se emplean metales elementales puros en aplicaciones de ingeniería. Incluso los materiales extremadamente refinados contienen impurezas que no pudieron eliminarse durante el proceso de refino. Además, la mayoría de los metales no tienen propiedades deseables en estado puro. Por ejemplo, el hierro y el aluminio utilizados en aplicaciones estructurales tienen elementos de aleación que aportan características especiales al metal. En consecuencia, comprender la naturaleza de los metales a nivel molecular requiere un examen de la estructura primaria del metal, del efecto de las velocidades de enfriamiento y de la influencia de las impurezas y de los elementos de aleación.

2.2.1 Estructura reticular

A medida que los metales se enfrían desde la fase líquida, los átomos se disponen en estructuras definidas que dependen del tamaño del átomo y de los electrones de valencia. Ciertas características son aparentes en la matriz tridimensional de puntos formada por la intersección de las lineas paralelas mostradas en la Figura 2.8. En esta configuración, la disposición de los puntos vecinos alrededor de cualquier punto específico es idéntica a la disposición existente alrededor de cualquier otro punto interno. Esta propiedad puede describirse matemáticamente mediante tres vectores unitarios, **a**, **b** y **c**. La posición de cualquier punto, **r´**, respecto a un punto de referencia puede definirse en función de un número entero de desplazamientos de vector:

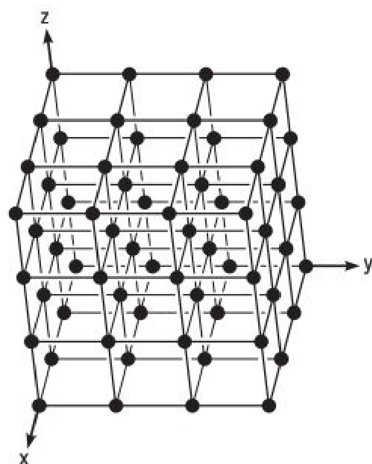


FIGURA 2.8 Estructura de paralelogramo para retículas cristalinas. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + n_1\mathbf{a} + n_2\mathbf{b} + n_3\mathbf{c} \tag{2.1}$$

Una repetición continua de la Ecuación 2.1, utilizando una secuencia creciente de enteros para n_1, n_2 y n_3 nos da el paralelogramo mostrado en la Figura 2.8, donde **r** es el vector de posición del origen respecto al punto de referencia. Hay que observar que los ángulos entre los ejes no tienen porqué ser iguales a 90 grados. Este tipo de red de líneas se denomina retícula espacial. Existen 14 posibles retículas espaciales en tres dimensiones que se pueden describir mediante los vectores **a**, **b** y **c**. Sin embargo, las retículas espaciales de los metales comunes en ingeniería pueden describirse mediante dos estructuras cúbicas y una estructura hexagonal, como se muestra en la Figura 2.9.

Una estructura reticular cúbica simple tiene un átomo en cada esquina de un cubo, formando los ejes ángulos de 90 grados y con longitudes de vector iguales. Sin embargo, esta estructura no es común, aunque existe en algunos metales. Hay dos variantes importantes de la estructura cúbica: la *estructura cúbica centrada en las caras* y la *estructura cúbica centrada en el cuerpo*. La primera de ellas (FCC, *Face Center Cubic*) tiene un átomo en cada esquina del cubo más un átomo en cada una de las caras, como se muestra en la Figura 2.9(a). La estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC, *Body Center Cubic*) tiene un átomo en cada una de las esquinas más otro en el centro del cubo, como se muestra en la Figura 2.9(b).

La tercera estructura reticular común en los metales es la *estructura de mallas cerradas hexagonales* (HCP, *Hexagonal Close Pack*). Como se puede ver en la Figura 2.9(c), la estructura HCP tiene las capas superior e inferior con átomos en cada una de las esquinas del hexágono y un átomo en el centro de los planos inferior y superior; además, hay tres átomos en un plano central. Estos átomos del plano central son equidis-

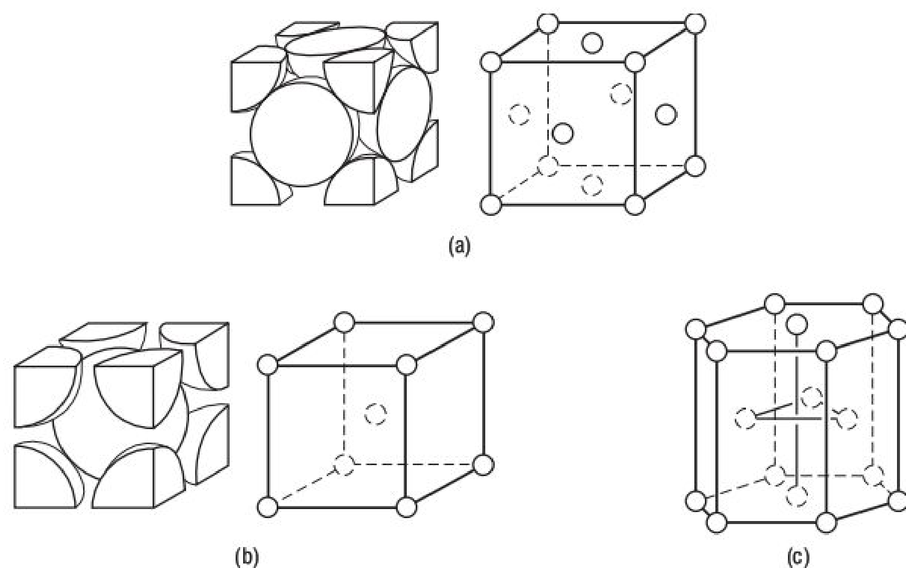


FIGURA 2.9 Estructuras reticulares para los metales: (a) cúbica centrada en las caras (FCC) (b) cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y (c) mallas cerradas hexagonales (HCP).

TABLA 2.3 Estructura reticular de los metales.

Metal	Estructura cristalina	Radio atómico (nm)	Metal	Estructura cristalina	Radio atómico (nm)
Aluminio	FCC	0,1413	Oro	FCC	0,1442
Cadmio	HCP	0,1490	Plata	FCC	0,1445
Cobalto	HCP	0,1253	Platino	FCC	0,1387
Cobre	FCC	0,1278	Plomo	FCC	0,1750
Cromo	BCC	0,1249	Tántalo	BCC	0,1430
Hierro	BCC	0,1241	Titanio	HCP	0,1445
Molibdeno	BCC	0,1363	Tungsteno	BCC	0,1371
Níquel	FCC	0,1246	Zinc	HCP	0,1332

tantes de todos los átomos vecinos. Consulte la Tabla 2.3 para ver las estructuras cristalinas y los radios atómicos de algunos metales.

Dos características importantes de las estructuras cristalinas son el número de coordinación y el factor de empaquetamiento atómico. El *número de coordinación* es el número de "vecinos más próximos". El número de coordinación para las estructuras FCC y HCP es 12, mientras que para las estructuras BCC es 8. Esto puede confirmarse examinando la Figura 2.9. El *factor de empaquetamiento atómico* (APF, *Atomic Packing Factor*) es la fracción del volumen de la celda unitaria que está ocupada por átomos de la estructura:

$$APF = \frac{\text{volumen de átomos en la celda unitaria}}{\text{volumen unitario total de la celda}} \tag{2.2}$$

Para calcular el factor de empaquetamiento atómico, hay que determinar el *número equivalente de átomos* asociado con cada celda unitaria, junto con el radio atómico de los átomos que se proporciona en la Tabla 2.3. El número equivalente de átomos asociado con una celda es el número de átomos en un bloque de gran tamaño del material dividido entre el número de celdas del bloque. Sin embargo, considerando adecuadamente la fracción de átomos de la Figura 2.9, podemos contar el número de átomos "enteros" existente en cada celda unitaria. La estructura FCC tiene ocho átomos en las esquinas, cada uno de los cuales es compartido con otras siete celdas unitarias. Por tanto, todos los átomos de las esquinas contribuyen conjuntamente con un único átomo al número de átomos de la celda unitaria. Los átomos de las caras sólo están compartidos con otra celda unitaria, por lo que cada uno de ellos contribuye con medio átomo. Puesto que hay seis caras, los átomos de las caras añaden tres átomos al recuento total. Sumando los átomos de las caras y las esquinas obtenemos un total de cuatro átomos. La estructura BCC tiene el equivalente de sólo dos átomos. La estructura HCP tiene un equivalente de seis átomos. Cada uno de los 12 átomos de las esquinas es compartido

por seis celdas unitarias, los átomos de las caras son compartidos entre dos celdas unitarias y los tres átomos de los planos centrales no se comparten con ninguna otra celda, por tanto, $12/6 + 2/2 + 3 = 6$.

Entonces podemos calcular el volumen de los átomos de la celda unitaria como el volumen de un átomo multiplicado por el número equivalente de átomos. El volumen de una esfera es $V = (4/3)\,\pi r^3$ donde r es el radio. El volumen de la celda unitaria puede determinarse a partir del radio de los átomos, y teniendo en cuenta el hecho de que los átomos están en contacto entre sí.

Problema de ejemplo 2.1

Demuestre que el factor de empaquetamiento atómico para la estructura reticular FCC de la Figura PE2.1) es 0,74.

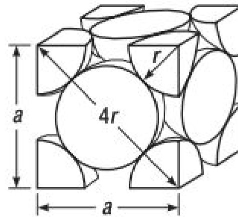


FIGURA PE2.1

Solución

Número equivalente de átomos completos en cada celda unitaria = 4

$$\text{Volumen de la esfera} = \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3$$

$$\text{Volumen de átomos en la celda unitaria} = 4 \times \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3 = \left(\frac{16}{3}\right)\pi r^3$$

Por inspección, la diagonal de la cara en una celda unitaria FCC = $4r$

Longitud de cada lado de la celda unitaria = $2\sqrt{2}r$

$$\text{Volumen de la celda unitaria} = \left(2\sqrt{2}r\right)^3$$

$$\text{APF} = \frac{\text{volumen de átomos en la celda unitaria}}{\text{volumen unitario total de la celda}} = \frac{\left(\frac{16}{3}\right)\pi r^3}{\left(2\sqrt{2}r\right)^3} = 0{,}74$$



Unas consideraciones geométricas similares permiten calcular el factor de empaquetamiento atómico para las estructuras BCC y HCP, siendo dicho valor 0,68 y 0,74, respectivamente.

La densidad de un metal es función del tipo de estructura reticular y se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A} \tag{2.3}$$

donde

ρ = densidad del material
n = número equivalente de átomos en la celda unitaria
A = masa atómica del elemento (gramos/mol)
V_C = volumen de la celda unitaria
N_A = Número de Avogrado ($6{,}023 \times 10^{23}$ átomos/mol)

Problema de ejemplo 2.2

Calcule el radio del átomo de aluminio, sabiendo que el aluminio tiene una estructura cristalina FCC, una densidad de 2,70 Mg/m^3 y una masa atómica de 26,98 g/mol. Observe que el APF para la estructura reticular FCC es igual a 0,74.

Solución

$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A}$$

Para una estructura reticular FCC, $n = 4$, por lo que

$$V_c = \frac{4 \times 26{,}98}{2{,}70 \times 10^6 \times 6{,}023 \times 10^{23}} = 6{,}636 \times 10^{-29}\ \text{m}^3$$

$$\text{APF} = 0{,}74 = \frac{4 \times \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3}{6{,}636 \times 10^{-29}}$$

$$r^3 = 0{,}293 \times 10^{-29}$$

$$r = 0{,}143 \times 10^{-9}\,\text{m} = 0{,}143\ \text{nm}$$



El conocimiento del tipo de estructura reticular es importante a la hora de determinar el comportamiento mecánico de un metal. Para un comportamiento elástico, los enlaces de los átomos se estiran o contraen, pero al eliminarse la carga, los átomos vuelven a su posición original. Por el contrario, la deformación plástica, por definición, constituye una distorsión permanente en el material; por tanto, la deformación plástica debe estar asociada con un cambio en la disposición atómica del metal. La deformación plástica es el resultado del deslizamiento relativo de los planos de átomos, a causa de la acción de tensiones de cizallamiento. Naturalmente, el deslizamiento se producirá en

aquellos planos que sean más susceptibles a la distorsión. Puesto que el mecanismo de enlace básico de los distintos metales es similar, las diferencias en la resistencia teórica de los materiales se atribuyen a las diferencias existentes en el número y la orientación de los planos de deslizamiento que resultan de las distintas estructuras reticulares.

2.2.2 Defectos de la retícula

Incluso bajo circunstancias especiales, es muy difícil recrecer estructuras cristalinas perfectas. Generalmente, las estructuras cristalinas puras están limitadas a una micra de diámetro. Estos materiales puros tienen una resistencia y un módulo de elasticidad que se aproximan a los valores máximos teóricos calculados a partir de las características de los enlaces. Sin embargo, la resistencia y la deformación de todos los materiales que se pueden obtener en la práctica están limitadas por los defectos del material. Son varias las causas que contribuyen al desarrollo de defectos en la estructura cristalina. Podemos clasificar dichas causas como sigue:

1. Defectos puntuales, debidos a la falta de algunos átomos.
2. Defectos lineales debidos a la falta de alguna fila de átomos, lo que comúnmente se denomina *dislocación de borde*.
3. Defectos de área o contornos de grano.
4. Defectos de volumen o cavidades del material.

En el caso de defectos puntuales, es posible que falten átomos aislados en la estructura reticular, debido a que los átomos vibran al efectuar la transición de líquido a sólido. Como resultado, un átomo puede vibrar en el área que debería ser ocupada por dos átomos dentro de la retícula. Estos huecos apenas tienen influencia sobre las propiedades del material.

Al considerar las diferencias entre el comportamiento de los materiales teóricos y el de los materiales fabricados, es importante comprender los defectos lineales. En la Figura 2.10 se muestra un defecto lineal típico, en donde se ve que falta una línea de átomos completa (Van Vlack, 1989; Guy y Hren, 1974). Los átomos situados por encima de la dislocación están sometidos a compresión, mientras que los situados por debajo de la dislocación están sometidos a una fuerza de tracción. Como resultado, la distancia entre los átomos no es la natural, con lo que los enlaces de esos átomos no se encuentran en el punto de mínima energía indicado en la Figura 2.2. En consecuencia, cuando se aplica una tensión en cizallamiento en ese preciso lugar, habrá una tendencia de los átomos a deslizarse de una forma progresiva de la posición (a) a la (b) y luego a la (c), como se muestra en la Figura 2.11 (Flinn y Trojan, 1986; Budinski, 1996).

Los defectos de volumen son fallos del material fabricado; por tanto, no vamos a ocuparnos de ellos. En cuanto a los defectos de área hablaremos de ellos a continuación.

2.2.3 Estructura granular

La estructura de los metales se ha descrito en términos de la celda unitaria o de la estructura cristalina repetitiva. Sin embargo, igualmente importante para el comporta-

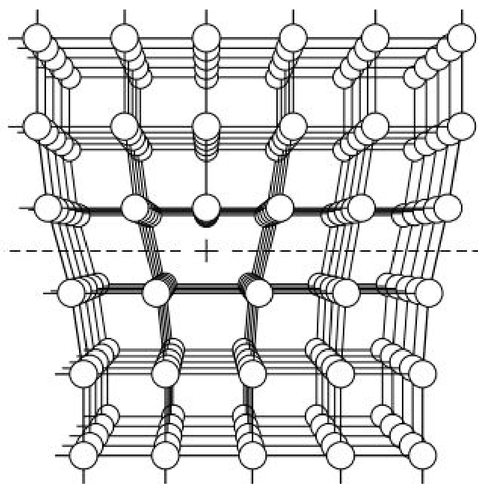


FIGURA 2.10 Empaquetamiento atómico en una zona con un defecto lineal. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

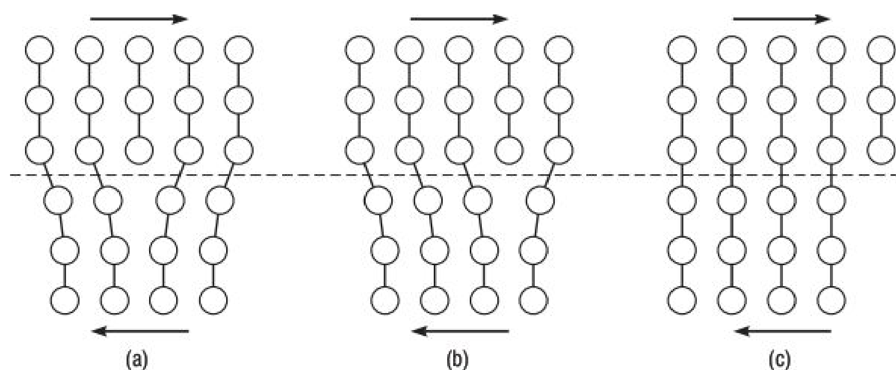


FIGURA 2.11 Deformación plástica que implica el movimiento de los átomos a lo largo de un plano de deslizamiento.

miento del material es el tamaño y disposición granular de ese material. La estructura de vetas (estructura microscópica) del material es diferente de la estructura atómica. Por ejemplo, la Figura 2.12 es un fotomicrografía óptica de un acero con bajo contenido de carbono. Esta fotomicrografía se obtuvo empleando un microscopio de barrido electrónico con un factor de amplificación de 500. Observe que esta escala macroscópica es muy diferente de la escala atómica de la Figura 2.9, en la que la imagen está ampliada en torno a 10.000.000 de veces.

En la fabricación de metales, el material se calienta hasta la fase líquida, eliminando las impurezas del material en bruto y añadiendo agentes de aleación. Una *aleación* es simplemente la adición de un segundo elemento a un metal. A medida que el mate-

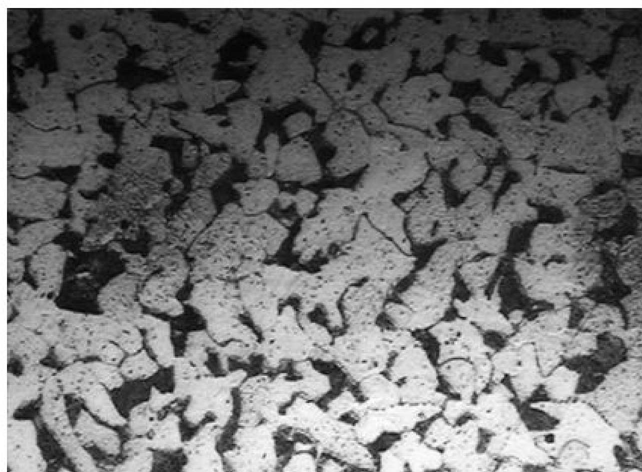


FIGURA 2.12 Fotomicrografía óptica de un acero con bajo contenido en carbono (ampliación: 500x).

rial se enfría desde el estado líquido, se forman cristales. Bajo condiciones de enfriamiento normales, se formarán múltiples núcleos, lo que produce múltiples cristales. A medida que estos cristales recrecen terminan por entrar en contacto entre sí, formando los contornos de grano. Para un material dado, el tamaño de los granos dependerá principalmente de la velocidad de enfriamiento. Con un enfriamiento rápido se formarán múltiples núcleos, lo que dará como resultado granos pequeños y la aparición de contornos por todo el material.

Existen cuatro tipos de contornos de grano: coherente, coherente deformado, semicoherente e incoherente, como se muestra en la Figura 2.13. En un contorno coherente, las retículas de los dos granos se alinean perfectamente y, en esencia, no existe frontera física. Los contornos en el caso de granos coherentes deformados tienen una distancia entre los átomos distinta a cada lado de la frontera, lo que puede ser el efecto de un agente de aleación. Al igual que sucedía con la dislocación de línea, habrá una deformación en la estructura atómica a cada lado del contorno, debido a la diferencia de espaciado entre los átomos. El contorno semicoherente tiene un número distinto de átomos a cada lado; por tanto, no todos los contornos pueden encajar. De nuevo, esto es similar a la dislocación de líneas, apareciendo deformaciones a cada lado del contorno.

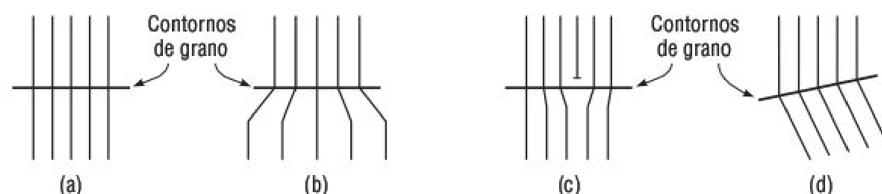


FIGURA 2.13 Tipos de contornos de grano: (a) coherente, (b) coherente deformado, (c) semicoherente y (d) incoherente.

El contorno incoherente tiene una orientación distinta a cada lado; por tanto, los átomos no encajan de forma natural.

Los contornos de grano tienen un efecto importante sobre el comportamiento de un material. Aunque los enlaces existentes a través del contorno de grano no tienen la resistencia de la estructura cristalina pura, los contornos de grano se encuentran en un estado energético superior al de los átomos situados lejos del contorno. Como resultado, cuando se produce un deslizamiento a lo largo de uno de los planos de deslizamiento del cristal, los átomos no pueden cruzar el contorno de grano, pudiendo solo desplazarse a lo largo de la frontera. Esto hace que se incremente la longitud de la trayectoria de deslizamiento, lo que hace que se requiera más energía para deformar o fracturar el material. Por tanto, la reducción del tamaño de grano hace que se incremente la resistencia de un material.

La estructura granular de los metales se ve afectada por las deformaciones plásticas. Los métodos de fabricación implican frecuentemente la utilización de deformaciones plásticas para producir una forma deseada (por ejemplo, los alambres metálicos se producen provocando estiramientos sucesivos en el metal, para reducir las dimensiones del mismo desde la forma obtenida en la fundición hasta el diámetro de hilo deseado).

Para refinar las estructuras granulares se emplean tratamientos de calor. Existen dos métodos básicos de tratamiento de calor: *recocción* y *templado*. Ambos procesos implican calentar el material hasta un punto en el que los contornos de grano existentes se rompan y vuelvan a formarse al enfriar el metal. Las diferencias entre los dos procesos son la temperatura hasta la que se calienta el material, la cantidad de tiempo que se mantiene el material a esa temperatura elevada y la velocidad de enfriamiento. En el templado, se consigue un enfriamiento rápido sumergiendo el material en líquido. En el recocido, el material se enfría lentamente. La velocidad más baja de enfriamiento se consigue dejando el material en el horno y reduciendo gradualmente la temperatura. Este proceso es muy caro, ya que obliga a dedicar el horno al mismo. Lo más común es que el material se enfríe al aire. Los tratamientos de calor del acero y el aluminio se explican en los Capítulos 3 y 4.

El tamaño del grano se ve afectado por la velocidad de enfriamiento. Un enfriamiento rápido limita el tiempo disponible para el recrecimiento del grano, lo que da como resultado gránulos pequeños, mientras que un enfriamiento lento hace que se formen gránulos de mayor tamaño.

2.2.4 Aleaciones

Las características de la mayoría de los elementos metálicos empleados en ingeniería hacen que resulte inadecuado utilizarlos en forma pura. En la mayoría de los casos, pueden mejorarse significativamente las propiedades de los materiales añadiendo agentes de aleación. Un agente de aleación es simplemente una sustancia química que está compuesta o en solución, en la estructura cristalina de un metal. La aleación más común quizá sea el acero, compuesto principalmente de hierro y carbono. La manera en que el agente de aleación encaja en la estructura cristalina es extremadamente im-

portante. Los átomos de aleación pueden encajar en los huecos entre átomos (átomos *intersticiales*) o pueden reemplazar a los átomos de la estructura reticular (átomos *sustitucionales*).

Puesto que los metales tienen una estructura de malla empaquetada, el radio del átomo intersticial tiene que ser 0,6 veces menor que el radio del elemento huésped (Derucher *et. al.*, 1994). Asimismo, el límite de solubilidad de los átomos intersticiales (inferior al 6%) es relativamente bajo. Los átomos intersticiales pueden ser de mayor tamaño que el hueco de la estructura reticular, lo que provocará una deformación de la estructura y, por tanto, limitará la solubilidad.

Si las características de dos elementos metálicos son suficientemente similares, los metales pueden tener una miscibilidad completa; es decir, no existe límite de solubilidad. Los átomos de los elementos serán entonces completamente intercambiables. Los criterios de similitud se definen mediante las reglas de Hume–Rothery (Shackelford, 1996). Según estas reglas, los elementos deben tener las siguientes características:

1. Diferencia inferior al 15% en los radios atómicos.
2. Misma estructura cristalina.
3. Electronegatividades similares (la capacidad del átomo para atraer a un electrón).
4. Misma valencia.

La violación de las reglas de Hume–Rothery reduce la solubilidad de los átomos. Los átomos que sean demasiado grandes o demasiado pequeños provocarán una deformación de la estructura reticular.

La disposición de los átomos de aleación en la estructura puede ser aleatoria u ordenada. En una disposición aleatoria no existe ningún patrón de colocación de los átomos de aleación. Una disposición ordenada puede desarrollarse si el elemento de aleación tiene preferencia por una cierta posición en la estructura reticular. Por ejemplo, en una aleación de oro–cobre, que tiene estructura FCC, el cobre ocupa preferentemente las posiciones de las caras, mientras que el oro ocupa preferentemente las posiciones de las esquinas.

Con frecuencia, se emplea más de un agente de aleación para modificar las características de un metal. El acero es un buen ejemplo de aleación de múltiples elementos. Por definición, el acero contiene hierro y carbono. Sin embargo, también se suelen incluir frecuentemente otros elementos de aleación tales como el cromo, el cobre, el níquel, el fósforo, etc.

2.2.5 Diagramas de fase

Para producir metales de aleación, los componentes se calientan hasta que se funden, luego se mezclan y, a continuación, se enfrían. La temperatura a la que se efectúa la transición entre la fase líquida y la fase sólida es función de los porcentajes de los componentes. Los estados líquido y sólido de un material se denominan fases, y los diagramas de fases permiten mostrar las relaciones entre los porcentajes de los elementos y las temperaturas de transición.

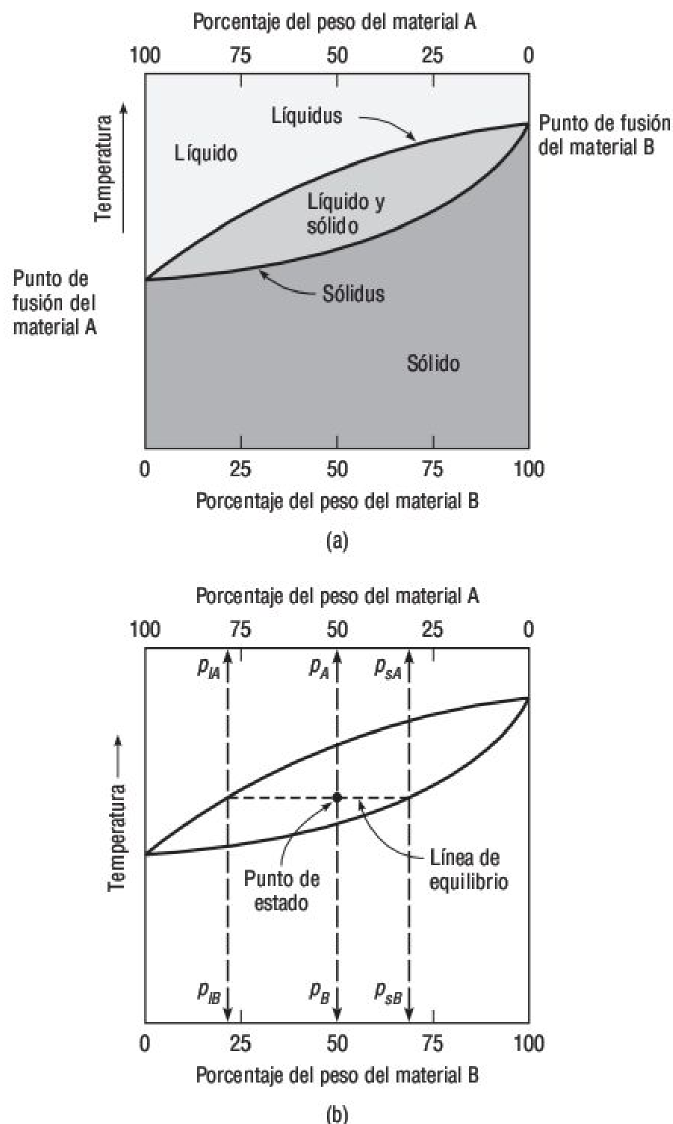


FIGURA 2.14 Diagrama de fases binario para dos elementos solubles.

Materiales solubles El tipo más simple de diagrama de fase es para dos elementos que sean completamente solubles tanto en la fase líquida como en la sólida. Las soluciones sólidas se producen cuando los elementos de la aleación permanecen dispersos a través de la matriz del material en el estado sólido. En la Figura 2.14(a) se muestra un diagrama de fases para dos elementos, o *binario*, que en este caso es para dos elementos completamente solubles. En este diagrama, la temperatura se dibuja en el eje vertical y el porcentaje de peso de cada elemento en el eje horizontal. En este caso, el eje superior se utiliza para el elemento A y el inferior, para el elemento B. El porcentaje del elemento B

se incrementa linealmente a lo largo del eje, mientras que el porcentaje del elemento A comienza en un 100% a la izquierda y se reduce hasta un 0% a la derecha. Puesto que se trata de un diagrama de fases binario, la suma de los porcentajes de los elementos A y B tiene que ser igual al 100%. En la Figura 2.14(a) se distinguen tres áreas. Las áreas de la parte superior e inferior del diagrama, tienen una única fase de material líquido y sólido, respectivamente. Entre estas dos áreas de una única fase, existe un área de dos fases en la que el material es a la vez líquido y sólido. La línea entre las áreas de líquido y la de dos fases se denomina *líquidus*, mientras que la línea entre el área de dos fases y el área sólida es el *sólidus*. Para determinada composición de los elementos A y B, el líquidus define la temperatura a la que se forman, al enfriarse, los primeros cristales sólidos. El sólidus define la temperatura a la que todo el material ha cristalizado. Hay que observar que para un elemento puro, la transición entre la fase líquida y la sólida se produce a una única temperatura. Esto se indica en el diagrama de fases en la convergencia del líquidus y el sólidus en las partes izquierda y derecha de la Figura 2.14(a), en las que se encuentran los elementos puros A y B, respectivamente.

Una composición específica de los elementos a una temperatura específica se denomina *punto de estado*, como se indica en la Figura 2.14(b). Si el punto de estado se encuentra por encima del líquidus, todo el material será líquido y la composición del mismo coincidirá con la composición total del material. De forma similar, si el punto de estado se encuentra por debajo del sólidus, todo el material será sólido y la composición del mismo coincidirá con la del material. En la región bifásica entre el líquidus y el sólidus, el porcentaje del material que se encuentra en fase líquida o sólida varía con la temperatura. Además, la composición de las fases líquida y sólida en esta región varía también con la temperatura. Las composiciones del líquido y el sólido se pueden determinar directamente a partir de la posición del punto de estado en el diagrama de fases. En primer lugar, se establece una *línea de equilibrio* conectando el líquidus y el sólidus mediante una línea horizontal que pasa por el punto de estado, como se muestra en la Figura 2.14(b). Una proyección vertical realizada a partir de la intersección de la línea de equilibrio y el líquidus define la composición de la fase líquida. Una proyección vertical a partir de la intersección de la línea de equilibrio y el sólidus define la composición de la fase sólida. Para el ejemplo de la Figura 2.14(b), la aleación está compuesta por un 50% del material A y un 50% del material B. Para el punto de estado definido, el 79% del material líquido será del elemento A y el 21% del elemento B, mientras que el 31% de la fase sólida del material corresponde al elemento A y el 69% al elemento B. Además, los porcentajes de material en las fases sólida y líquida pueden determinarse a partir del diagrama de fases. Teniendo en cuenta el equilibrio de masas, la masa total del material será igual a la suma de las masas de los componentes; es decir,

$$m_t = m_l + m_s \tag{2.4}$$

donde

m_t = masa total del material.
m_l = masa total del material que está en fase líquida.
m_s = masa total del material que está en fase sólida.

Este equilibrio de masas también se aplica a cada uno de los materiales componentes; es decir,

$$p_B m_t = p_{lB} m_l + p_{sB} m_s \tag{2.5}$$

donde

p_{lB} = porcentaje de la fase de líquida que está compuesta de material B.
p_{sB} = porcentaje de la fase de sólida que está compuesta de material B.
p_B = porcentaje de material correspondiente al componente B.

A partir de estas dos ecuaciones podemos calcular la cantidad de material en las fases líquida y sólida como sigue:

$$p_B m_t = p_{lB} m_l + p_{sB}(m_t - m_l)$$

$$p_B m_t = p_{lB} m_l + p_{sB} m_t - p_{sB} m_l$$

$$p_B m_t - p_{sB} m_t = p_{lB} m_l - p_{sB} m_l$$

$$m_l = \frac{(p_B - p_{sB})}{(p_{lB} - p_{sB})} m_t$$

$$m_s = m_t - m_l \tag{2.6}$$

Problema de ejemplo 2.3

Considere una aleación formada por dos componentes solubles A y B y descrita por un diagrama de fases similar al mostrado en la Figura 2.14. Determine las masas de la aleación que están en las fases líquida y sólida a una determinada temperatura, si la masa total de la aleación es de 100 gramos, el componente B representa el 40% de la aleación, el 20% del líquido corresponde al componente B y un 70% del sólido corresponde al componente B.

Solución

m_t = 100 g
p_B = 40%
p_{lB} = 20%
p_{sB} = 70%

A partir de las Ecuaciones 2.4 y 2.5,

$$m_l + m_s = 100$$

$$20 m_l + 70 m_s = 40 \times 100$$

Si resolvemos el sistema de ecuaciones, obtenemos

m_l = masa de la aleación que está en fase líquida = 60 g
m_s = masa de la aleación que está en fase sólida = 40 g

La misma respuesta puede obtenerse aplicando la Ecuación 2.6.

Materiales insolubles Hasta ahora hemos centrado la exposición en dos materiales completamente solubles. También es importante entender el diagrama de fases para el caso de materiales inmiscibles; es decir, para componentes que son tan distintos que su solubilidad mutua es prácticamente despreciable en la fase sólida. La Figura 2.15 muestra el diagrama de fases para esta situación. Las intersecciones del líquidus con los ejes derecho e izquierdo corresponden a los puntos de fusión de cada uno de los componentes. Como los materiales están mezclados, la línea del líquidus tiene forma de V. El vértice de la V define la combinación de los componentes que cambiará de líquido a sólido sin que se formen dos fases. Este punto define la temperatura eutéctica y la composición eutéctica de los componentes. El sólidus es una línea horizontal y pasa a través de la temperatura eutéctica. Existen por tanto dos áreas con dos fases. El área situada a la izquierda de la composición eutéctica tendrá el componente sólido A, mientras que la fase líquida será una mezcla de los componentes A y B (y lo contrario es cierto para el área situada a la derecha de la composición eutéctica).

La súbita transformación de fase a la temperatura eutéctica significa que los granos no tienen tiempo de recrecer a medida que se enfría el material. Por tanto, el material autéctico tendrá una estructura granular fina.

Si el material se enfría a una temperatura distinta de la temperatura eutéctica, uno de los componentes se solidificará cuando la temperatura caiga por debajo del líquidus. Como resultado, la cantidad de este componente en el líquido decrece continuamente mientras el material se enfría en el área bifásica. De hecho, la composición del líquido seguirá al líquidus a medida que se reduzca la temperatura. Al alcanzar la temperatura autéctica, el líquido restante se transformará en sólido y tendrá una estructura granular fina. Si comenzamos con una composición del 80% de B y del 20% de A, como se indica en la Figura 2.15, al bajar la temperatura a *T*, el líquido contendrá un 55% de B y un 45% de A. La cantidad de cada componente en las fases líquida y sólida puede determinarse mediante las ecuaciones de equilibrio de masas (Ecuaciones 2.4 y 2.5). A la

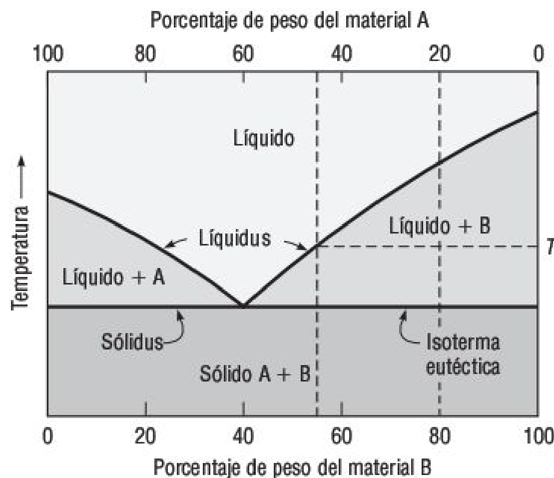


FIGURA 2.15 Diagrama de fases binario para sólidos insolubles.

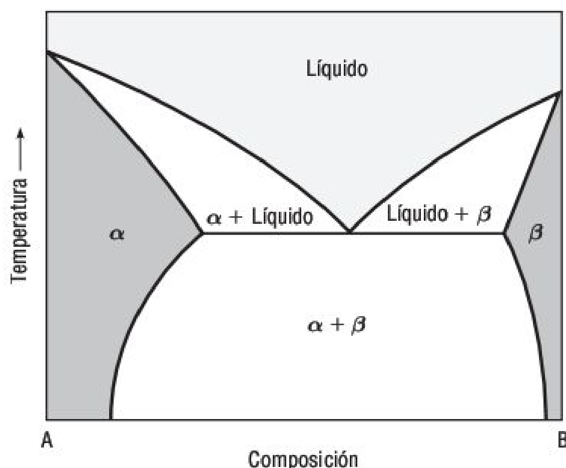


FIGURA 2.16 Diagrama de fases binario para materiales parcialmente solubles.

temperatura *T*, esto nos da un 44,4% de líquido y un 55,6% de sólido; todo el sólido corresponderá al componente B. De forma similar, puede calcularse la composición del sólido para la temperatura eutéctica, obteniéndose como resultado un 66,7% de sólido B y un 33,3% de mezcla eutéctica. Puesto que estos materiales son insolubles en el estado sólido, la mezcla autéctica está compuesta de una mezcla microscópica de pequeños cristales de A y B, formando por lo general una estructura de placas.

Materiales parcialmente solubles Entremedias de los materiales puramente solubles y los insolubles están los materiales que son parcialmente solubles. En otras palabras, hay un límite de solubilidad entre los componentes A y B. Si el porcentaje del componente B es menor o igual al límite de solubilidad, al producirse el enfriamiento todos los átomos de B estarán en solución con el componente A. Si el porcentaje del componente B se encuentra por encima del límite de solubilidad, los átomos en exceso que no puedan ser parte de la solución formarán gránulos separados del componente B. El resultado se muestra en el diagrama de fases de la Figura 2.16. Observe que la única diferencia entre este diagrama de fases y el mostrado en la Figura 2.15 es la presencia de las regiones de solución sólida a cada lado de la gráfica. El análisis de composición de la región bifásica es igual que en el caso de la Figura 2.15.

Reacción eutectoide Hasta ahora hemos utilizado el diagrama de fases para describir la transición entre las fases líquida y sólida de los materiales. Sin embargo, la estructura reticular de algunos elementos (por ejemplo, el hierro) es una función de la temperatura del sólido. Como resultado de la transformación reticular, la microestructura del material sólido cambia en función de la temperatura, como se muestra en el diagrama de fases de la Figura 2.17. Cuando esto sucede, se produce una reacción eutectoide en el diagrama de fases, el cual tiene características similares a la reacción eutéctica, pero se aplica a una transformación de la estructura reticular del material, en lugar de a una

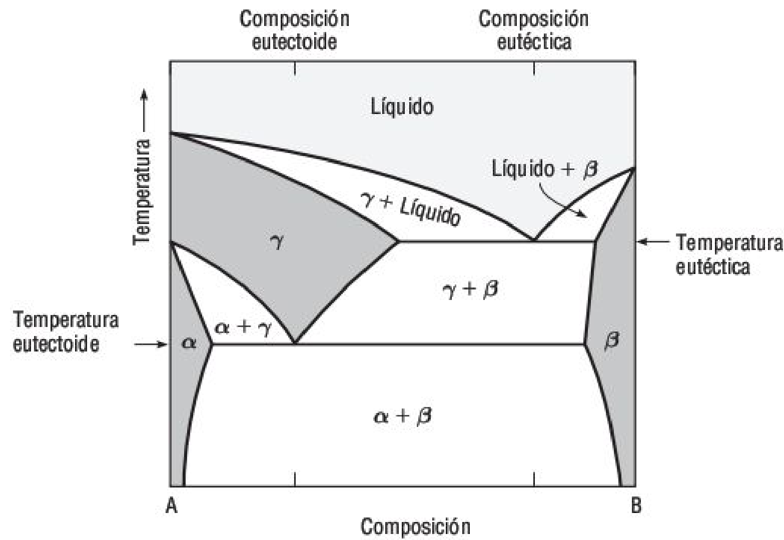


FIGURA 2.17 Diagrama de fases para una reacción eutectoide.

transformación líquido–sólido. Las reglas para el análisis de los componentes del material son los mismos que se han explicado para los materiales autécticos. Al igual que sucede con la transformación de fases a la temperatura eutéctica, la transformación de la estructura reticular a la temperatura eutectoide tiene como resultado la creación de materiales de gránulo fino.

2.2.6 Efectos combinados

Los temas de estructura reticular, tamaño de gránulo, tratamientos de calor y aleaciones están estrechamente relacionados. El comportamiento de un metal está dictado por la combinación de todos estos factores. Obviamente, las propiedades de un metal dependerán de la composición elemental, del proceso de refinado y producción, y de los tipos y proporciones de aleaciones usadas en el metal. Estos temas son demasiado complejos como para tratarlos en detalle en este libro. Un ingeniero que trabaje en esta área debe dedicar un tiempo de estudio considerable a las características de los materiales y al impacto de las aleaciones y los tratamientos de calor. Debido a la importancia del acero en la ingeniería civil, presentaremos en el Capítulo 3 el diagrama de fases y los tratamientos de calor para el acero.

2.3 Sólidos inorgánicos

Los sólidos inorgánicos incluyen todos los materiales compuestos por elementos no metálicos o una combinación de elementos metálicos y no metálicos. Esta clase de ma-

teriales se denomina en ocasiones materiales cerámicos. Por definición, los elementos cerámicos tienen cinco, seis y siete electrones de valencia. Los materiales cerámicos se forman mediante una combinación de enlaces iónicos y covalentes. En un sentido general, los materiales cerámicos comprenden una amplia variedad de materiales, incluyendo el vidrio, la alfarería, los cementos inorgánicos y diversos óxidos. Los productos de arcilla cocida, incluyendo los ladrillos y la alfarería, se encuentran entre los productos cerámicos más antiguos fabricados por el hombre. En términos de tonelaje, el hormigón de cemento portland es el material fabricado que más se usa hoy día. En la década de 1980, la búsqueda de productos con una alta durabilidad y con propiedades térmicas y de resistencia especiales dio inicio al rápido desarrollo de elementos cerámicos avanzados, como las zirconias, los óxidos de aluminio, los carburos de silicio y los nitratos de silicio. Estos materiales presentan una alta resistencia, una gran rigidez y son también resistentes al desgaste y a la corrosión. Las cerámicas de gama alta, o cerámicas para ingeniería, han encontrado multitud de aplicaciones en el diseño de maquinaria y herramientas. Aunque la disponibilidad de cerámicas de alta gama ha aumentado rápidamente, las aplicaciones de estos materiales en la ingeniería civil y la construcción han sido generalmente limitadas debido al coste de esas cerámicas sofisticadas y a su falta de tenacidad frente a la fractura, que es una característica necesaria en el diseño de estructuras.

Se han definido cinco clases de materiales cerámicos (Ashby y Jones, 1986):

1. Vidrios: basados en silicio.
2. Cerámicas vítreas: productos arcillosos empleados para alfarería, ladrillos, etc.
3. Cerámicas de gama alta: sólidos inorgánicos altamente refinados utilizados para aplicaciones especiales en las que sus propiedades, no disponibles en otros materiales, compensan el alto coste.
4. Cemento y hormigón: un material multifásico muy utilizado en ingeniería civil.
5. Rocas y minerales.

Las cerámicas también pueden clasificarse según el tipo predominante de enlace atómico. Los materiales compuestos por elementos metálicos y no metálicos tienen, fundamentalmente, enlaces iónicos. Los materiales compuestos por dos elementos no metálicos tienen predominantemente enlaces covalentes. El tipo de enlace dicta la estructura cristalina del compuesto. Al igual que los metales, los sólidos inorgánicos tienen una estructura de celda unitaria bien definida, aunque más compleja. Esta estructura se repite en la formación de los cristales.

En un compuesto iónico simple, el elemento no metálico formará una estructura cúbica centrada en las caras o una estructura de mallas cerradas hexagonales, como se muestra en la Figura 2.18. En esta estructura, aparece un agujero octaédrico definido mediante la conexión de todos los átomos de las caras de la celda unitaria FCC. Asimismo, aparecen una serie de agujeros tetraédricos, que se forman al conectar un átomo de esquina con los átomos de las caras adyacentes. En la estructura FCC hay un agujero octaédrico y seis agujeros tetraédricos. El número de átomos y la forma en que encajan en la estructura reticular está determinado por el número de electrones de valencia

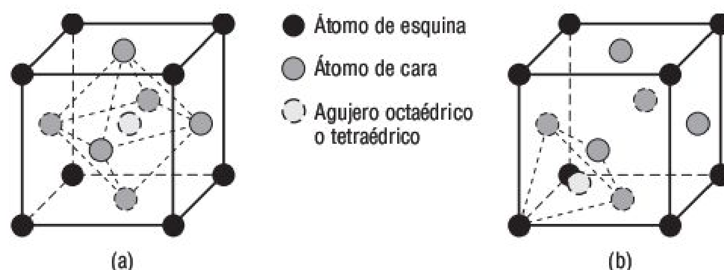


FIGURA 2.18 Estructura reticular para materiales cerámicos simples con enlaces iónicos: (a) agujero octaédrico y (b) agujero tetraédrico.

de los elementos metálicos y no metálicos. Los átomos intentan empaquetarse para maximizar la densidad, con la restricción de que el vecino más próximo no puede ser otro ion similar (Ashby y Jones 1986).

Los enlaces covalentes simples forman materiales de gran durabilidad y fuerza. El diamante es el ejemplo preminente de material elemental de alta resistencia. Se emplea ampliamente en aplicaciones industriales en las que es necesaria una gran resistencia al desgaste, como por ejemplo en herramientas de corte. Sin embargo, el más importante de los materiales utilizados por ingenieros civiles que predominantemente tienen enlaces covalentes son los compuestos de silicatos del hormigón de cemento portland. Los átomos de silicio se enlazan con cuatro átomos de oxígeno para formar un tetraedro estable (Figura 2.19), que es el bloque componente básico de todos los silicatos. Cuando se combinan con óxidos metálicos, MO, con una relación de $MOSiO_2$ igual a 2 o superior, el silicato resultante está compuesto de monómeros SiO_4 separados, enlazados por las moléculas MO. La Figura 2.20 muestra la estructura del cristal de silicato de calcio. Los componentes principales de reacción del cemento portland son silicatos bicálcicos y tricálcicos. Cada uno de ellos tiene dos o más óxidos metálicos, CaO, por cada molécula de silicato, formándose un enlace iónico entre el óxido metálico y el silicato.

Los elementos cerámicos tienen solo aproximadamente una quinta parte de la tenacidad frente a la fractura de los metales. Debido a la naturaleza de los enlaces iónicos y covalentes, los compuestos cerámicos tienden a fracturarse de forma quebradiza en lugar de presentar una deformación plástica, como sucede en los metales. Al igual que los metales, los compuestos cerámicos forman gránulos diferenciados como resultado

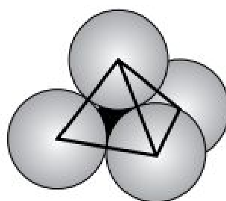


FIGURA 2.19 Tetraedro de silicato.

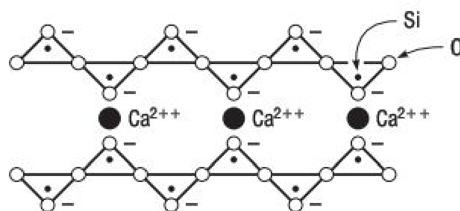


FIGURA 2.20 Estructura de sólido inorgánico simple (silicato de calcio).

de la formación de múltiples cristales a partir de múltiples núcleos durante la producción del compuesto. Además, debido al proceso de producción, los materiales cerámicos tienden a presentar fisuras y fallas internas. En las fisuras, en las fallas y en los contornos de granos se produce una concentración de las tensiones, lo cual contribuye a reducir la resistencia y tenacidad del material. Como resultado, los materiales cerámicos tienen una baja resistencia a la tracción y deben ser reforzados cuando se los utiliza para aplicaciones estructurales.

Los vidrios son un tipo especial de sólido inorgánico; no desarrollan una estructura cristalina. Los vidrios comerciales están basados en silicio. En el vidrio, los tetraedros de silicio se enlazan por las esquinas, lo que da como resultado una estructura aleatoria y amorfa. El vidrio puede estar hecho de silicio puro; en ese caso, tiene un alto punto de reblandecimiento y una baja expansión térmica. Sin embargo, debido al alto punto de reblandecimiento, resulta complicado conformar el vidrio de silicio puro. En consecuencia, se añaden óxidos metálicos para reducir los interenlazamientos de los silicatos, mejorándose así la capacidad para conformar el vidrio de la manera adecuada. Aunque el vidrio tiene una estructura amorfa, es un compuesto muy estable a temperaturas atmosféricas. No fluye, a pesar del ejemplo tan citado de las ventanas de vidrio de las iglesias europeas.

2.4 Sólidos orgánicos

Todos los sólidos orgánicos están compuestos por largas moléculas de átomos de carbono con enlaces covalentes. Estas moléculas son cadenas de carbono e hidrógeno combinadas con varios componentes radicales. El componente radical puede ser un átomo de hidrógeno, otro hidrocarburo u otro elemento. Estas largas moléculas están enlazadas mediante enlaces secundarios; en muchos casos, las moléculas también se interenlazan mediante enlaces covalentes. Existe un amplio rango de sólidos orgánicos utilizados en ingeniería. Podemos clasificar estos sólidos como sigue (Ashby y Jones, 1986):

1. Los *termoplásticos* se caracterizan mediante cadenas lineales de átomos de carbono que no están interenlazados; a bajas temperaturas, una serie de enlaces secundarios adhieren las cadenas. Al calentar el material, los enlaces secundarios se funden y

los termoplásticos se transforman en un material viscoso. El asfalto es un termoplástico natural, que se obtiene principalmente refinando petróleo. Además, existen muchos termoplásticos artificiales que tienen muchas aplicaciones dentro de la ingeniería. Entre ellos podemos incluir el polietileno, el polipropileno, el politetrafluroetileno, el poliestireno y el cloruro de polivinilo. El polietileno y el polipropileno se emplean en la fabricación de tuberías, botellas y aislamiento eléctrico. El politetrafluroetileno se conoce comúnmente con el nombre de teflón. Además de aplicaciones para cocina, el teflón se utiliza para cojinetes y juntas debido a su muy baja fricción y sus buenas características adhesivas (el politetrafluroetileno es una cadena de carbono–flúor). El poliestireno se emplea para objetos moldeados y se espuma mediante dióxido de carbono, con el fin de fabricar materiales para empaquetado y aislamiento térmico. El cloruro de polivinilo se emplea para conductos de agua de baja presión.

2. Los *plásticos termoestables* se fabrican generalmente mediante una resina y un agente endurecedor que reacciona químicamente para endurecerse. En la formación del sólido, las cadenas de carbono se interenlazan para formar compuestos estables, que no se reblandecen al calentarlos. Los tres tipos generales de plásticos termoestables son el epoxi, el poliéster y el fenol–formaldehído. Los epoxis se utilizan como colas y como matriz en los compuestos plásticos. El poliéster es un material fibroso utilizado en la fase de refuerzo de la fibra de vidrio. Los fenol–formaldehídos son plásticos quebradizos como la baquelita y la formica.
3. Los *elastómeros* o *gomas* se caracterizan como polímeros lineales con interenlaces limitados. A temperaturas atmosféricas los enlaces secundarios ya se han fundido. Los interenlaces permiten al material volver a su forma original cuando se elimina la carga. Podemos citar tres formas de elastómeros, que son el poli-isopreno (goma natural), el polibutadieno (goma sintética) y el policloropreno (neopreno).
4. Los *materiales naturales* se caracterizan por haber crecido en forma de planta. El material principal de interés para nosotros es la madera, que está compuesta de celulosa, lignina y proteínas.

Dejando aparte los polímeros naturales, el resto de los sólidos orgánicos se obtienen refinando y procesando petróleo. En general, estos productos se clasifican como plásticos. Las propiedades de dichos materiales son altamente variables. Sus propiedades mecánicas dependen de la longitud de las cadenas poliméricas, del grado de interenlazamiento y del tipo de compuesto radical. Todos estos factores pueden controlarse y alterarse durante el proceso de producción con el fin de modificar las propiedades del material.

2.4.1 Desarrollo, estructura e interenlaces de los polímeros

La estructura física de la cadena polimérica afecta en gran medida a la respuesta mecánica de los plásticos. La palabra polímero significa literalmente "múltiples unidades mer". El mer es una molécula base que puede enlazarse con otras moléculas similares para formar los polímeros. La Figura 2.21 muestra la estructura de una molécula de eti-

leno simple y el desarrollo de un polímero. Los cuadrados son átomos de carbono y los círculos son átomos de hidrógeno. La formación del polímero requiere la ruptura del doble enlace, la activación del monómero y que se permita a este enlazarse con otros para formar una cadena de gran longitud. El final de la cadena se enlaza con otras cadenas o con una molécula de terminación, como por ejemplo OH. Las cadenas con propiedades mecánicas útiles requieren al menos 500 monómeros. El número de monómeros de la cadena define el grado de polimerización; los polímeros comerciales tienen un grado de polimerización comprendido entre 10^3 y 10^5.

La complejidad de la celda lineal polimérica se incrementa sustituyendo los átomos de hidrógeno por grupos laterales de radicales, como se muestra en la Figura 2.21. Los radicales o grupos laterales pueden alinearse a un lado de la cadena (*isotácticos*), pueden alinearse simétricamente en lados alternos de la cadena (*sindiotácticos*), o pueden alinearse de forma aleatoria (*atácticos*). Los radicales pueden ser moléculas simples o complejas. Por ejemplo, el cloruro de polivinilo tiene un radical Cl, el polipropileno tiene un radical CH_3 y el poliestireno tiene C_6H_5. La capacidad de las cadenas poliméricas para apilarse queda determinada por la disposición de las cadenas laterales. Las cadenas simples pueden doblarse para adoptar una posición ordenada, mientras que los grupos laterales complejos impiden el apilamiento, lo que hace que los materiales correspondientes tengan una naturaleza amorfa.

Se pueden formar polímeros lineales más complejos al sustituir dos de los átomos de hidrógeno por diferentes radicales. El polimetilmetacrilato (plexiglás) tiene los radi-

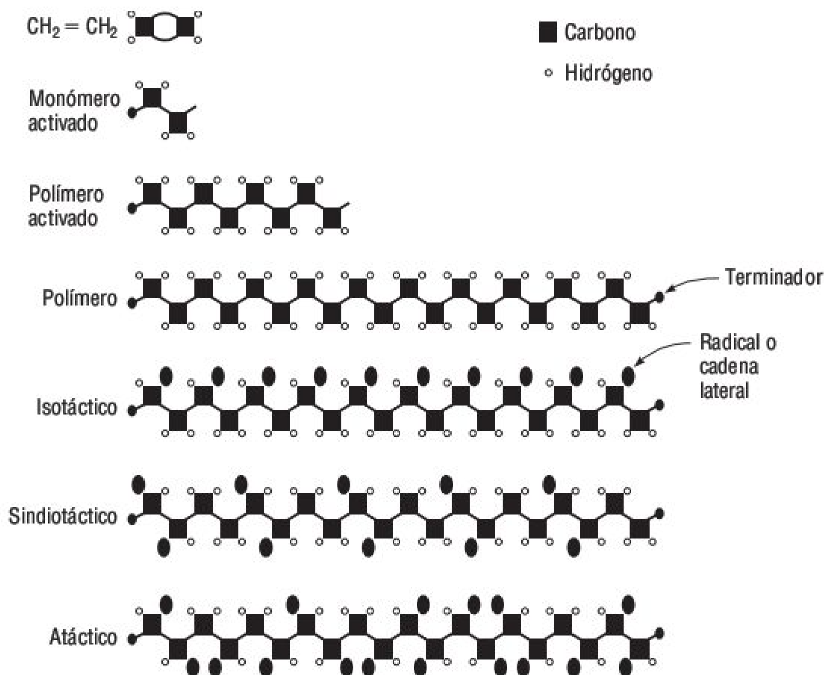


FIGURA 2.21 Estructuras poliméricas.

cales CH_3 y $COOCH_3$. A medida que se sustituyen más átomos de hidrógeno y que se incrementa la complejidad de los radicales, resulta más difícil formar patrones regulares.

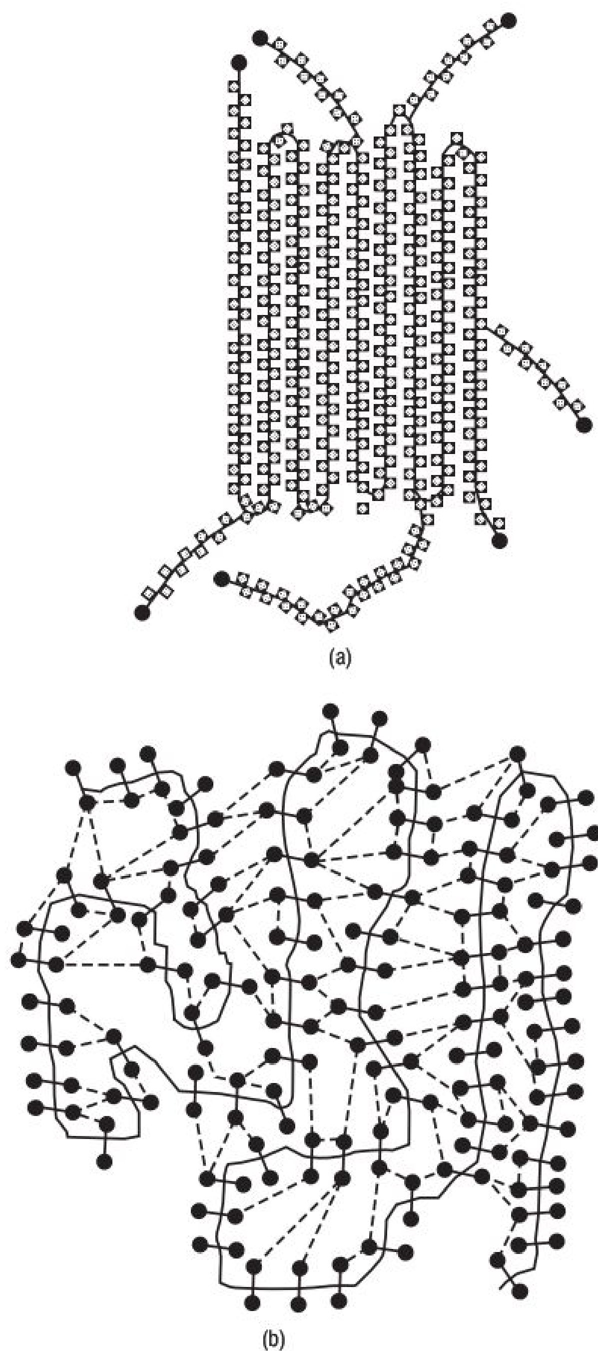


FIGURA 2.22 Estructuras de cadena poliméricas: (a) estructura ordenada de polímero lineal y (b) estructura interenlazada de polígono lineal.

En los termoplásticos, formados a partir de polímeros lineales, la estructura de las moléculas es una mezcla de estructura amorfa y cristalina. Cuando hay pocos grupos laterales, se genera una estructura ordenada [Figura 2.22(a)]. A medida que se incrementa el número de grupos laterales, la estructura pasa a ser cada vez más aleatoria y aparecen interenlaces (enlaces reticulares). Estas estructuras se muestran en la Figura 2.22(b). Los plásticos termoestables se forman a partir de monómeros polifuncionales, que se crean en una reacción de condensación. En esencia, la reacción enlaza dos cadenas entre sí. Puesto que las cadenas se forman a partir de cristales polifuncionales, tiene una estructura amorfa con múltiples interenlaces. Los elastómeros se forman mediante cadenas lineales que tienen un número limitado de interenlaces.

2.4.2 Fusión y temperatura de transición del vidrio

La reacción de los polímeros a la temperatura depende del grado en el que el material haya cristalizado. Los polímeros altamente ordenados tienen una transición bastante bien definida entre el comportamiento elástico y el viscoso. A medida que se reduce el porcentaje de cristalización, el punto de fusión pasa a no estar tan bien definido. Sin embargo, el punto en el que estos polímeros efectúan la transición a una fase vítrea sí está bien determinado. A temperaturas elevadas, el movimiento de las moléculas provoca una separación entre las mismas, dando como resultado un volumen que es mayor que el requerido para albergar las moléculas estáticas estrechamente empaquetadas. Este volumen en exceso se denomina *volumen libre*. A medida que el material se enfría, el movimiento de las moléculas se reduce y la viscosidad se incrementa. Para una temperatura suficientemente baja, las moléculas dejan de ser libres para reordenarse; en consecuencia, su posición queda fija y el volumen libre pasa a ser cero. Esta es la temperatura de transición vítrea. Por debajo de esta temperatura, los enlaces secundarios ligan las moléculas del material para formar un sólido amorfo; por encima de esta temperatura, el material se comporta de forma elástica. La Figura 2.23 ilustra el concepto de temperaturas de fusión y de transición vítrea, Tm y T_g. La temperatura de transición vítrea del plexiglás es de 100°C; a temperatura ambiente es un sólido quebradizo. Por encima de T_g, adquiere una consistencia primero de cuero y luego de goma. T_g para la goma natural es igual a −70ºC y es flexible a todas las temperaturas atmosféricas. Sin embargo, cuando se congela, por ejemplo con nitrógeno líquido, se transforma en un sólido quebradizo.

2.4.3 Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de los polímeros está directamente relacionado con el grado de orientación de las moléculas y con la cantidad de interenlaces covalentes. El módulo de un polímero es el promedio de la rigidez de los enlaces y puede estimarse a partir de las fracciones volumétricas de los enlaces covalentes (Ashby y Jones, 1986):

$$\varepsilon = f\frac{\sigma}{E_1} + (1-f)\frac{\sigma}{E_2} \tag{2.7}$$

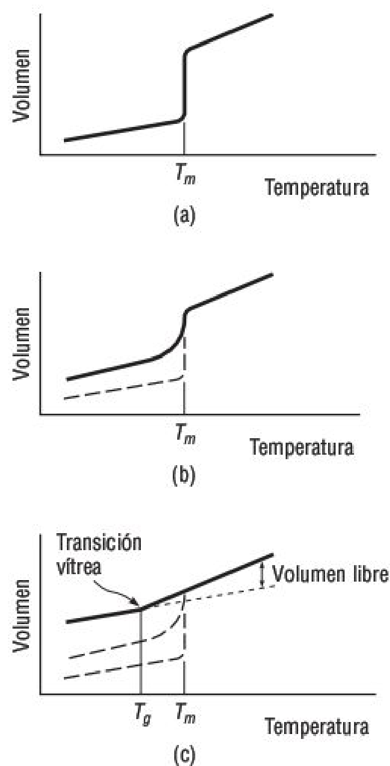


FIGURA 2.23 Punto de fusión y temperatura de transición vítrea: (a) cristalización perfecta, (b) cristalización imperfecta y (c) formación de vidrio.

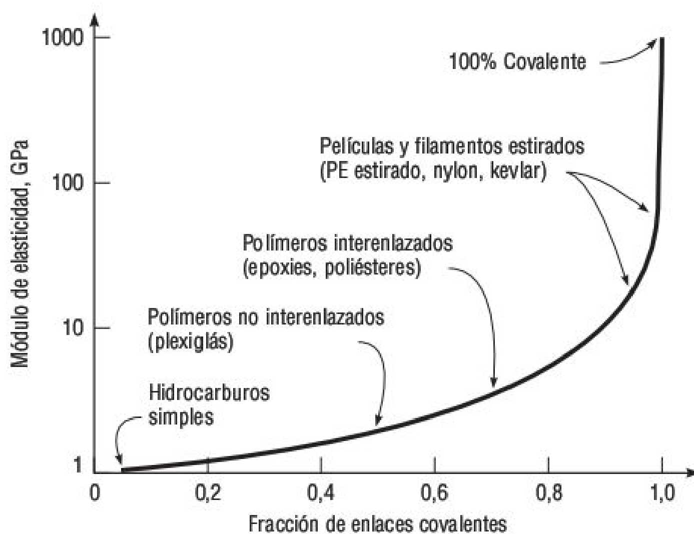


FIGURA 2.24 Módulo de polímeros.

donde

ε = deformación del material.
σ = esfuerzo del material.
f = fracción de los enlaces covalentes .
E_1 = rigidez de los enlaces covalentes, unos 1000 GPa para el diamante.
E_2 = rigidez de los enlaces secundarios, aproximadamente 1 GPa para la cera de parafina.

Basándonos en la Ecuación 2.7, podemos calcular el módulo esperado de diversos polímeros para temperaturas inferiores a la temperatura de transición vítrea, como se muestra en la Figura 2.24.

RESUMEN

El comportamiento de los materiales importantes en el campo de la ingeniería está directamente relacionado con su estructura microscópica y macroscópica. Aunque actualmente nuestra compresión acerca de estos materiales es imperfecta, buena parte de su comportamiento puede atribuirse a los enlaces y a la disposición de los materiales en el nivel atómico. En este capítulo solo se proporciona de manera superficial una panorámica general del tema. Si desea obtener más información, consulte las referencias que proporcionan un tratamiento más detallado de estos temas.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

2.1 Defina los comportamientos elástico y plástico en los niveles microscópico y macroscópico.

2.2 Describa las partes de un átomo. Defina los conceptos de protón, electrón, número atómico y masa atómica.

2.3 ¿Qué son los electrones de valencia y por qué son importantes?

2.4 Describa el orden en que los electrones rellenan las capas y subcapas.

2.5 Describa los diferentes tipos de enlaces.

2.6 ¿Por qué los átomos mantienen separaciones específicas?

2.7 Generalmente, los materiales se clasifican en tres categorías, basándose en el tipo predominante de enlace. ¿Cuáles son esas tres categorías y cuáles son los tipos predominantes de enlace en cada una de ellas? Proporcione dos ejemplos de ma-

teriales comunes utilizados por los ingenieros civiles para cada una de las categorías.

2.8 ¿Qué es el factor de empaquetamiento atómico? ¿Qué información se necesita para calcularlo?

2.9 Describa las estructuras reticulares FCC, BCC y HCP.

2.10 Demuestre para la estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) que la longitud de la arista de la celda unitaria a y que la longitud del radio atómico r están relacionados mediante la fórmula $a = 2\sqrt{2}r$.

2.11 Basándose en la estructura reticular BCC mostrada en la Figura P2.11

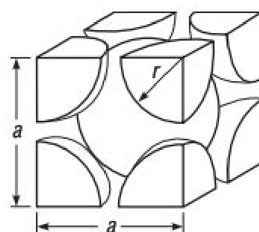


FIGURA P2.11

a. Determine el número equivalente de átomos completos de la celda unitaria.
b. Calcule la relación entre a y r.
c. Calcule el factor de empaquetamiento atómico de la estructura reticular BCC si el volumen de la esfera es $4/3\pi r^3$.

2.12 Calcule el volumen de la celda unitaria del hierro, en metros cúbicos, sabiendo que el hierro tiene una estructura BCC y un radio atómico de 0,124 nm.

2.13 Si el aluminio tiene una estructura cristalina FCC y un radio atómico de 0,143 nm, calcule el volumen de su celda unitaria en metros cúbicos.

2.14 Utilizando la información disponible en la Tabla 2.3, calcule el volumen de la celda unitaria del cobre, en metros cúbicos.

2.15 Calcule la densidad del hierro sabiendo que tiene un estructura cristalina BCC, un radio atómico de 0,124 nm y una masa atómica de 55,9 g/mol.

2.16 Calcule la densidad del aluminio, sabiendo que tiene una estructura cristalina FCC, un radio atómico de 0,143 nm y una masa atómica de 26,98 g/mol.

2.17 Calcule el radio del átomo de cobre, sabiendo que el cobre tiene una estructura cristalina FCC, una densidad de 8,89 g/cm^3 y una masa atómica de 63,55 g/mol.

2.18 ¿Cuáles son las clases de defectos de una estructura cristalina?

2.19 ¿Por qué se forman gránulos en las estructuras cristalinas?

2.20 Explique el efecto del deslizamiento de los átomos y la influencia que tiene en la deformación de los materiales.

2.21 Dibuje el diagrama de fases para dos componentes solubles.

2.22 ¿Qué es la composición eutéctica y por qué es importante?

2.23 Considere una aleación de dos componentes solubles A y B descrita por un diagrama de fases similar al mostrado en la Figura 2.14, determine las masas de la aleación que hay que en las fases líquida y sólida a una temperatura determinada si la masa total de la aleación es de 100 gramos, el componente B representa el 65% de la aleación, el 30% del líquido corresponde al componente B y el 80% del sólido corresponde al componente B.

2.24 Considere una aleación de dos componentes solubles A y B descrita por un diagrama de fases similar al mostrado en la Figura 2.14, determine las masas de la aleación que hay que en las fases líquida y sólida a una temperatura determinada si la masa total de la aleación es de 100 gramos, el componente B representa el 45% de la aleación, el 17% del líquido corresponde al componente B y el 65% del sólido corresponde al componente B.

2.25 La Figura P2.25 muestra una parte del diagrama de fases de H_2O–NaCl.

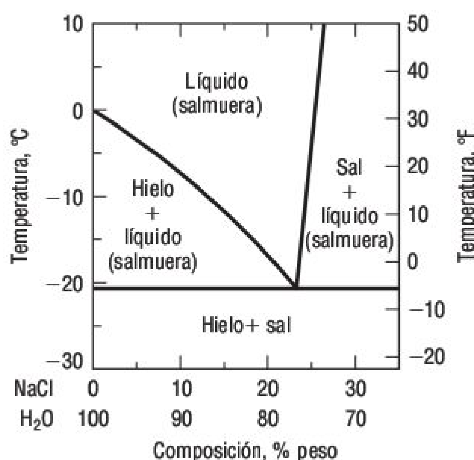


FIGURA P2.25

a. Utilizando el diagrama, explique brevemente por qué el esparcir sal sobre el hielo provoca que el hielo se funda. Proporcione ejemplos numéricos en su explicación.

b. Para una proporción de sal del 10%, ¿cuál es la temperatura a la que el hielo comenzará a fundirse?

c. ¿Cuál es la temperatura eutéctica de la combinación de hielo y sal?

2.26 ¿Cuáles son las cinco clases de materiales cerámicos?

2.27 ¿Cuáles son los cuatro tipos de sólidos orgánicos utilizados en las aplicaciones de ingeniería? Defina cada uno de ellos y dé algunos ejemplos.

2.5 Referencias

Ashby M. F. y D. R. H. Jones. *Engineering Materials 2, an Introduction to Microstructures, Processing and Design*. International Series on Materials Science and Technology, Vol. 39. Oxford: Pergamon Press, 1986.

Budinski, K. G. *Engineering Materials, Properties and Selection*. Quinta edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

Callister, W. D., Jr. *Material Science and Engineering, an Introduction*. Sexta edición. Nueva York: John Wiley & Sons, 2003.

Derucher, K. N., G. P. Korfiatis y A. S. Ezeldin. *Materials Civil & Highway Engineers*. Tercera edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1994.

Flinn, R. A. y P. K. Trojan. *Engineering Materials and their Applications*. Tercera edición. Boston, MA: Houghton Mifflin, 1986.

Guy, A. G. and J. J. Hren. *Elements of Physical Metallurgy*. Tercera edición. Reading, MA: Addison-Wesley, 1974.

Jackson, N. y R. K. Dhir, eds. *Structural Engineering Materials*. Cuarta edición. Nueva York: Hemisphere, 1988.

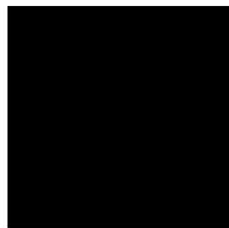
Jastrzebski, Z. D. *Nature and Properties of Engineering Materials*. Tercera edición. Nueva York: John Wiley & Sons, 1987.

Shackelford, J. F. *Introduction to Materials Science Engineers*. Cuarta edición. Nueva York: Macmillan, 1996.

Van Vlack, L. H. *Elements of Materials Science*. Segunda edición. Reading, MA: Addison-Wesley, 1964.

Van Vlack, L. H. *Elements of Materials Science and Engineering*. Sexta edición. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

3



ACERO

El uso del hierro se remonta al año 1500 a.C., cuando se utilizaban hornos primitivos para calentar el mineral en un fuego de carbón vegetal. Los metales ferrosos se produjeron a una escala relativamente pequeña hasta que se desarrollaron los altos hornos en el siglo XVIII. En la última parte de dicho siglo y en la primera del XIX, el uso de los productos de hierro estaba ampliamente extendido. La producción de acero comenzó a mediados del siglo XVII, cuando se inventó el convertidor Bessemer. En la segunda mitad del siglo XIX, la tecnología del acero avanzó rápidamente gracias al desarrollo del horno básico de oxígeno y de los métodos de colada continuos. Más recientemente, los sistemas informatizados de control de fabricación han permitido incrementar la eficiencia y reducir el coste de la producción de acero.

Actualmente, el acero y las aleaciones de acero se utilizan ampliamente en aplicaciones de ingeniería civil. Además, el hierro forjado se sigue empleando a menor escala para la fabricación de conductos, así como para trabajos generales de forja. El hierro fundido se utiliza para conductos, ferretería y componentes de máquinas no sujetos a cargas de tracción o dinámicas.

Los productos de acero utilizados en la construcción pueden clasificarse como sigue:

1. El *acero estructural* se emplea en placas, barras, conductos, formas estructurales, etc. (Figura 3.1).
2. *Productos de conexión* utilizados para conexiones estructurales, incluyendo pernos, tuercas y arandelas.
3. *Armaduras de acero* utilizadas para reforzar el hormigón (Figura 3.2).
4. Productos misceláneos para aplicaciones tales como moldes y recipientes.

Los ingenieros civiles y de la construcción raramente tienen la oportunidad de especificar una fórmula para obtener acero con propiedades específicas. En lugar de ello, se ven limitados a seleccionar entre los productos ofrecidos por los proveedores. Incluso las formas de los elementos estructurales están restringidas generalmente a aquellas que los fabricantes pueden suministrar fácilmente. Aunque se pueden fabricar a medida formas específicas, el coste de fabricación de elementos especiales en



FIGURA 3.1 Armazón de acero estructural para el soporte estructural de un edificio.

pequeñas cantidades, normalmente, es prohibitivo. Por tanto, la mayoría de los proyectos de ingeniería civil se diseñan utilizando formas estructurales y tipos de acero estándar.

Aún cuando los ingenieros civiles y de la construcción no son responsables de proporcionar las fórmulas de los productos de acero, sí que tienen que comprender cómo se fabrica y trata el acero, y cómo responde a las cargas y a las condiciones ambientales. En este capítulo se repasa el proceso de producción del acero, el diagrama de fases hierro–carbono, los tratamientos térmicos, las aleaciones de acero, el acero estructural, los productos de acero para sujeción y las armaduras de acero. El capítulo también presenta las pruebas comunes empleadas para caracterizar las propiedades mecánicas del acero. También se abordan los temas del soldado y la corrosión del acero.

3.1 Producción del acero

En la Figura 3.3 se muestra el proceso global de producción del acero. Este proceso consta de las tres fases siguientes:

1. Reducción del mineral de hierro a arrabio.
2. Refinado del arrabio para producir acero.
3. Conformación del acero para construir los productos.



FIGURA 3.2 Armadura de acero utilizada para reforzar una pared de hormigón de cemento portland.

Los materiales usados para producir arrabio son carbón, piedra caliza y mineral de hierro. El carbón, después de su transformación en coque, suministra el carbono utilizado para reducir los óxidos de hierro contenidos en el mineral. La piedra caliza se emplea para eliminar las impurezas. Antes de la reducción, la concentración de hierro en el mineral se incrementa por triturado y lavado del mineral. El hierro se extrae magnéticamente de los escombros y el material extraido se conforma en una serie de pellas y se incinera. El mineral procesado contiene aproximadamente un 65% de hierro.

La reducción del mineral a arrabio se lleva a cabo en un alto horno. El mineral se calienta en presencia de carbono. El oxígeno del mineral reacciona con el carbono para formar gases, utilizándose un fundente para ayudar a eliminar las impurezas. El hierro fundido, con un exceso de carbono en solución, se acumula en la parte inferior del horno. Las impurezas, la escoria, flotan por encima del arrabio fundido.

El carbono en exceso, junto con otras impurezas, debe eliminarse para obtener acero de alta calidad. Utilizando el mismo proceso de refinado, pueden reciclarse virutas de acero. Para refinar el arrabio en acero se emplean tres tipos de horno:

1. Horno de reverbero.
2. Horno básico de oxígeno.
3. Horno eléctrico.

Los hornos de reverbero y básico de oxígeno eliminan el exceso de carbono haciendo reaccionar el carbono con el oxígeno para formar gases. Una serie de lanzas hacen

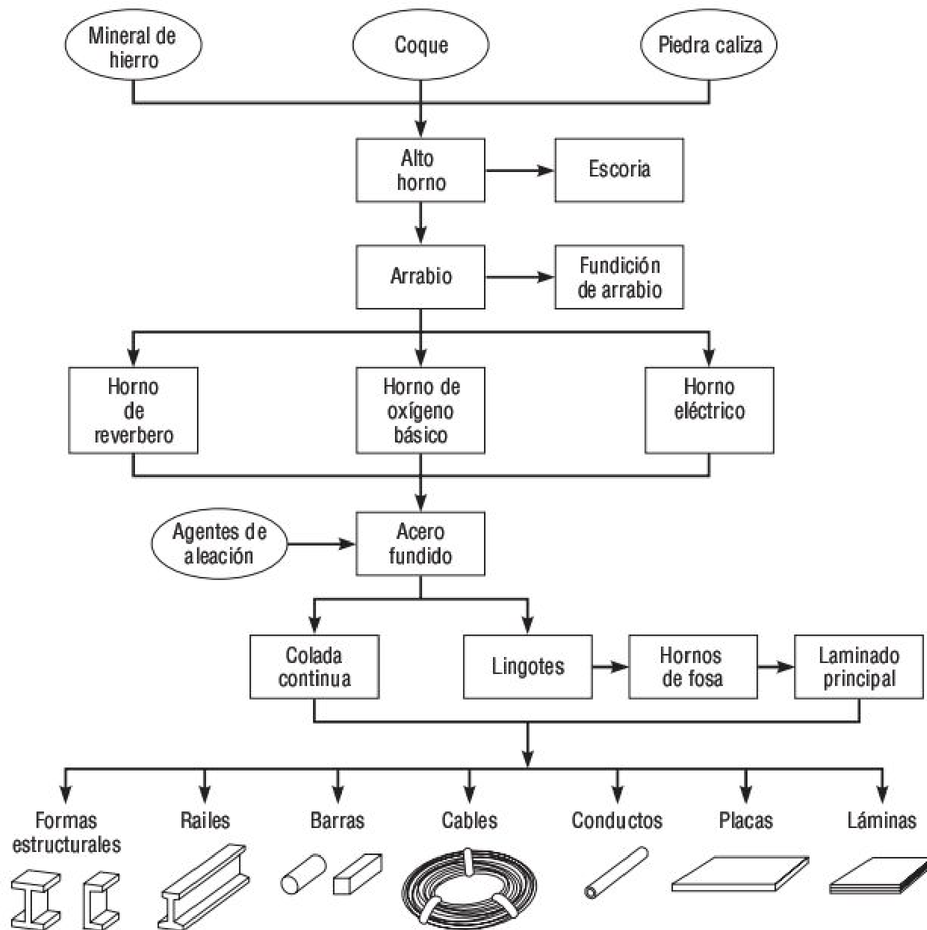


FIGURA 3.3 Conversión del material en bruto en diferentes productos de acero.

circular el oxígeno a través del material fundido. El proceso continúa hasta que se eliminan todas las impurezas y se consigue el contenido de carbono deseado. Los hornos de reverbero se han estado utilizando desde principios del siglo XX. Ahora, debido a la mayor eficiencia y productividad, el estándar en las acererías de alto volumen son los hornos básicos de oxígeno. Uno de estos hornos puede refinar 280.000 kg (300 toneladas) de acero en 25 minutos, comparado con las ocho horas que se tarda en refinar la misma cantidad de acero en un horno de reverbero.

Los hornos eléctricos utilizan un arco eléctrico entre electrodos de grafito para fundir y refinar el acero. Estas plantas requieren una enorme cantidad de energía y se emplean principalmente para reciclar chatarra de acero. Los hornos eléctricos se utilizan frecuentemente en minifundiciones, que producen un rango limitado de productos. En este proceso, el acero fundido se transfiere a la cuchara de colada. Los elementos de aleación y los agentes adicionales pueden añadirse en el horno o en la cuchara de colada.

Durante el proceso de producción del acero, puede que se disuelva oxígeno en el metal líquido. A medida que el acero se solidifica, el oxígeno puede combinarse con el carbono para formar burbujas de monóxido de carbono que quedan atrapadas en el acero y pueden actuar como punto de partida de un fallo. Los agentes desoxidantes, como el aluminio, el ferrosilicio y el manganeso, pueden eliminar la formación de las burbujas de monóxido de carbono. Los aceros completamente desoxidados se denominan *aceros calmados*. Entre los aceros que suelen calmarse están:

- Aquellos que tienen un contenido de carbono superior al 0,25%.
- Todos los aceros maleables.
- Los aceros estructurales con un contenido de carbono comprendido entre el 0,15 y el 0,25 por ciento.
- Algunos aceros especiales con bajo contenido en carbono.

Independientemente del proceso de refino, el acero fundido, con la composición química deseada, se moldea en lingotes (grandes bloques de acero) o se utiliza una colada continua para moldearlo con la forma deseada. La colada continua se está convirtiendo en el método de producción estándar, ya que es más eficiente en términos energéticos que el moldeado de lingotes, ya que los lingotes deben recalentarse antes de dar al acero la forma del producto final.

3.2 Diagrama de fases hierro–carbono

Al refinar el acero a partir del mineral de hierro, la cantidad de carbono utilizada debe controlarse cuidadosamente para que el acero tenga las propiedades deseadas. La razón para que exista esa relación tan fuerte entre las propiedades del acero y el contenido de carbono puede entenderse examinando el diagrama de fases hierro–carbono.

La Figura 3.4 presenta un diagrama de fases hierro–carbono que tiene una aceptación bastante generalizada. Una de las características distintivas de este diagrama es que la abscisa se extiende solo hasta el 6,7% en lugar de hasta el 100%. Esto es así por convenio. En un material rico en hierro, cada átomo de carbono se enlaza con tres átomos de hierro para formar carburo de hierro, Fe_3C, también denominado cementita. El carburo de hierro tiene un 6,7% de carbono, en términos de peso. Por tanto, en el diagrama de fases, un peso de carbono del 6,7% corresponde al 100% de carburo de hierro. Un diagrama de fases completo para el hierro–carbono debería extenderse hasta el 100% de carbono. Sin embargo, solo la parte rica en hierro, mostrada en la Figura 3.4, tiene un significado práctico (Callister, 2003). De hecho, los aceros estructurales tienen un contenido máximo de carbono inferior al 0,3%, de modo que solo una parte muy pequeña de este diagrama de fases tiene significado para los ingenieros civiles.

El lado izquierdo de la Figura 3.4 muestra que el hierro puro pasa por dos transformaciones a medida que se incrementa la temperatura. El hierro puro por debajo de 912°C tiene una estructura cristalina BCC conocida como ferrita. A 912°C, la ferrita sufre un cambio polimórfico, adoptando una estructura FCC denominada austenita.

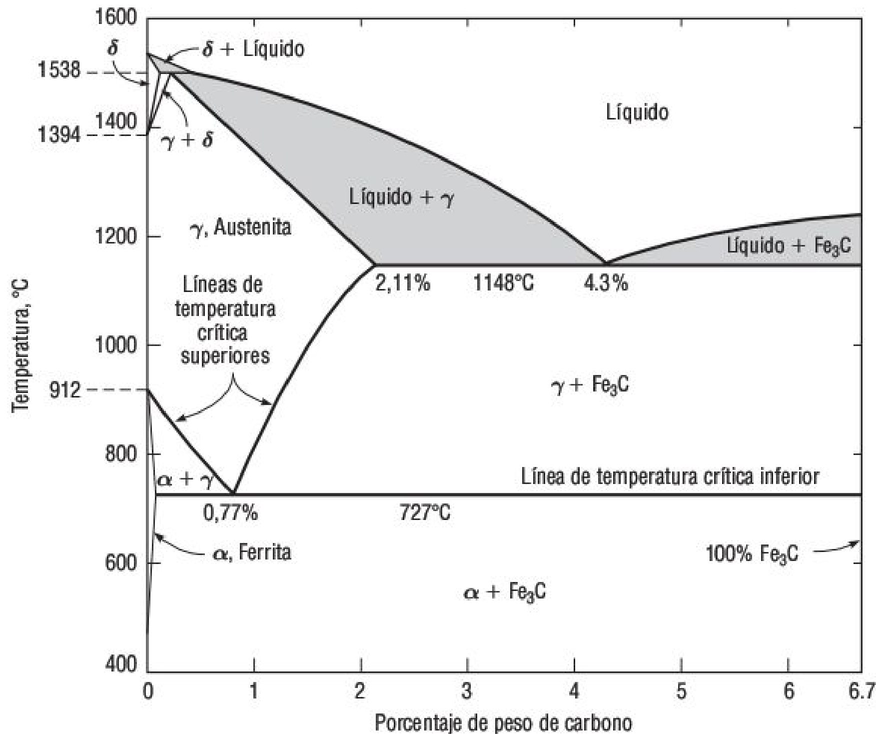


FIGURA 3.4 Diagrama de fases para el hierro–carburo de hierro.

A 1394°C, se produce un nuevo cambio polimórfico, volviendo a adoptar el hierro una estructura BCC. A 1539°C, el hierro se funde pasando a líquido. Las ferritas de alta y baja temperatura se identifican con las designaciones, ferrita δ y ferrita α, respectivamente. Puesto que la ferrita δ sólo aparece a temperaturas muy altas, no tiene ningún significado a efectos prácticos, en lo que a este texto respecta.

El carbono entra en solución con la ferrita α a temperaturas comprendidas entre 400°C y 912°C. Sin embargo, el límite de solubilidad es muy bajo, con un máximo del 0,022% a 727°C. A temperaturas por debajo de 727°C y a la derecha de la línea del límite de solubilidad, la ferrita α y el carburo de hierro coexisten como dos fases. Entre 727°C y 1148°C, la solubilidad del carbono en la austenita se incrementa desde el 0,77% al 2,11%. La solubilidad del carbono en la austenita es mayor que en una ferrita, debido a la estructura cristalina de la primera.

Para un 0,77% de carbono y a una temperatura de 727°C se produce una reacción eutectoide; es decir, se produce un cambio de la fase sólida cuando cambia la temperatura o el contenido de carbono. Para un 0,77% de carbono y por encima de 727°C, el carbono se encuentra en solución como elemento intersticial, dentro de la estructura FCC de la austenita. Una caída de temperatura por debajo de 727°C, que suceda de forma lo suficiente lenta como para permitir que los átomos alcancen una condición de equilibrio, dará como resultado un material de dos fases, ferrita y carburo de hierro. La ferrita α tendrá un 0,022% de carbono en solución, y el carburo de hierro tendrá un contenido de

carbono del 6,7%. La ferrita y el carburo de hierro formarán una estructura de finas placas, o laminillas. Este material eutectoide se denomina perlita.

Para un contenido de carbono inferior al de la composición eutectoide, que es del 0,77% de carbono, se forman aleaciones *hipoeutectoides*. Considere un contenido de carbono del 0,25%. Por encima de aproximadamente 860°C, existirá austenita sólida con carbono en solución. La austenita está compuesta por gránulos de material uniforme formados al enfriar el acero de líquido a sólido. Cuando la temperatura de equilibrio cae de 860°C a 727°C, se forma ferrita α y se acumula en los contornos de grano de la austenita. Esto es una ferrita proeuctoide. A temperaturas ligeramente por encima de 727°C, la ferrita tendrá un 0,022% de carbono en solución y la austenita tendrá un 0,77% de carbono. Cuando la temperatura desciende por debajo de 727°C, la austenita se transforma en perlita. La estructura resultante consta de gránulos de perlita rodeados por un esqueleto de ferrita α.

Cuando el contenido de carbono es superior al de la composición eutectoide, 0,77% de carbono, se forman aleaciones hipereutectoides. En ese caso, se forman carburos de hierro en los contornos de grano de la austenita a temperaturas por encima de 727°C. La microestructura resultante estará compuesta de granos de perlita rodeados por un esqueleto de carburo de hierro.

Podemos utilizar el análisis de la línea de equilibrio de los diagramas de fase para determinar las fases y los constituyentes del acero.

Problema de ejemplo 3.1

Calcule las cantidades y composiciones de la fases y constituyentes de un acero compuesto de hierro y de un 0,25% de carbono, justo por encima y por debajo de la isoterma eutectoide.

Solución

Para una temperatura ligeramente superior a 727°C, toda la austenita tendrá un contenido de carbono del 0,77% y se transformará en perlita. La ferrita continuará como ferrita primaria. Las proporciones pueden determinarse utilizando la línea de equilibrio:

Primaria α: 0,022% C,

$$\text{Porcentaje primaria } \alpha = \left[\frac{0{,}77 - 0{,}25}{0{,}77 - 0{,}022}\right] \times 100 = 69{,}5\%$$

$$\text{Porcentaje perlita} = \left[\frac{0{,}25 - 0{,}022}{0{,}77 - 0{,}022}\right] = 30{,}5\%$$

A una temperatura justo por debajo de 727°C, las fases son ferrita y carburo de hierro. La ferrita tendrá un 0,022% de carbono, por lo que tendremos

$$\text{Porcentaje ferrita } \alpha \ (0{,}022\% C) = \left[\frac{6{,}67 - 0{,}25}{6{,}67 - 0{,}022}\right] \times 100 = 96{,}6\%$$

$$\text{Porcentaje perlita} = \left[\frac{0{,}25 - 0{,}022}{6{,}67 - 0{,}022}\right] = 3{,}4\%$$



La Figura 3.5 muestra una fotomicrografía óptica de una placa de acero dulce laminada en caliente con un contenido de carbono del 0,18% en peso y decapada con nitinol al 3%. La fotomicrografía está ampliada 50×. La parte clara del fotodecapado es ferrita proeutectiode y el componente oscuro es perlita. Observe la estructura en bandas resultante del proceso de laminado. La Figura 3.6 muestra el mismo material que la Figura 3.5, salvo porque el grado de ampliación es de 400×. Con estas ampliaciones, se pueden observar las capas alternadas de ferrita y cementita en la perlita.

La importancia de la formación de ferrita, perlita y carburo de hierro es que las propiedades del acero dependen en gran medida de las proporciones relativas del carburo

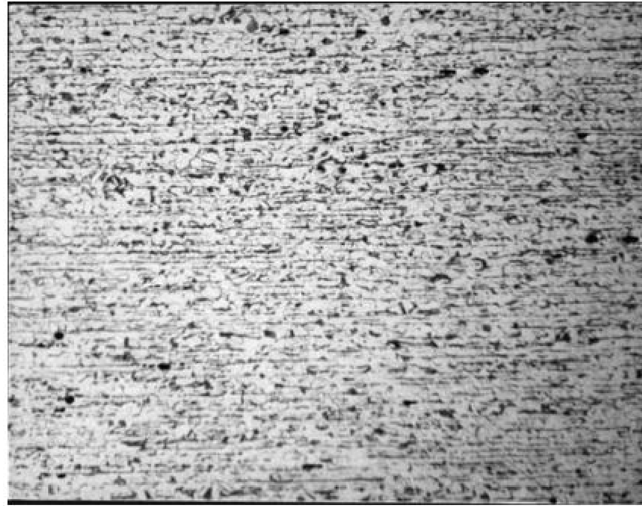


FIGURA 3.5 Fotomicrografía óptica de una placa de acero dulce laminada en caliente (ampliación: 50x).

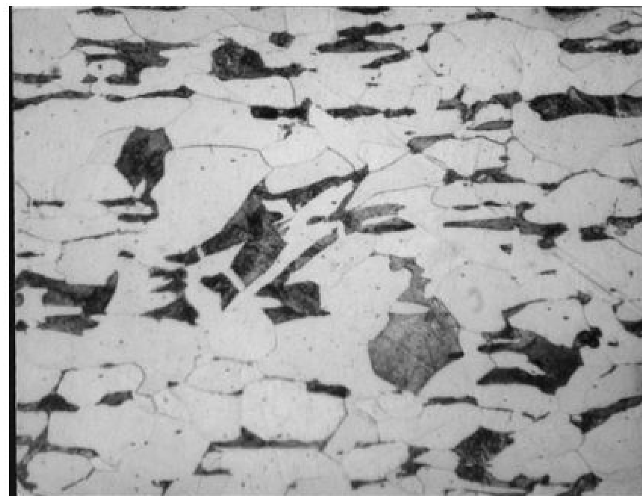


FIGURA 3.6 Fotomicrografía óptica de una placa de acero dulce laminada en caliente (ampliación: 400x).

de hierro y la perlita. La ferrita tiene una resistencia relativamente baja, pero es muy dúctil. El carburo de hierro, por su parte, tiene una alta resistencia pero su ductilidad es prácticamente nula. Combinando estos materiales en diferentes proporciones se alteran las propiedades mecánicas del acero. Al incrementar el contenido del carbono se aumentan la resistencia y la dureza, pero se reduce la ductilidad. Sin embargo, el módulo de elasticidad del acero no cambia al alterar el contenido de carbono.

Todas las reacciones precedentes son para velocidades de reducción de la temperatura que permiten al material alcanzar el equilibrio. Un enfriamiento a velocidades más altas altera enormemente la microestructura. Las velocidades de enfriamiento moderadas producen bainita, una perlita de estructura fina sin fase proeuctoide. Un enfriamiento rápido produce martensita; el carbono está sobresaturado en el hierro, haciendo que se forme una estructura reticular tetragonal centrada en el cuerpo. Los diagramas de transformación tiempo–temperatura se utilizan para predecir la temperatura y las propiedades del acero sujeto a tratamiento térmico. En lugar de analizar los detalles específicos, lo que haremos será describir los distintos tipos de termotratamientos.

3.3 Tratamiento térmico del acero

Las propiedades del acero pueden modificarse aplicando diversos tratamientos térmicos. Por ejemplo, mediante dichos tratamientos, el acero puede ser endurecido o ablandado; la respuesta del acero a estos procesos depende de la composición de su aleación. Entre los termotratamientos comunes empleados para el acero se incluyen el recocido, la normalización, el endurecimiento y el templado. El proceso básico consiste en calentar el acero hasta una temperatura específica, mantener esa temperatura durante un periodo de tiempo determinado y luego enfriar el material a una velocidad especificada. Las temperaturas utilizadas para cada uno de dichos tipos de tratamientos se muestran en la Figura 3.7.

3.3.1 Recocido

El objetivo del recocido es refinar el grano, ablandar el acero, eliminar tensiones internas, eliminar gases, incrementar la ductilidad y la tenacidad, y modificar las propiedades eléctricas y magnéticas. Pueden realizarse cuatro tipos de recocido dependiendo del resultado deseado del tratamiento térmico:

El *recocido completo* requiere calentar el acero hasta aproximadamente 50°C por encima de la línea de temperatura austenítica y mantener esa temperatura hasta que todo el acero se transforme en austenita o en austenita–cementita, dependiendo del contenido de carbono. A continuación, el acero se enfría a una velocidad de unos 20°C por hora en un horno, hasta alcanzar una temperatura de unos 680°C, seguido de un enfriamiento mediante convección natural hasta la temperatura ambiente. Debido a la baja velocidad de enfriamiento, la estructura granular es una perlita gruesa con ferrita o

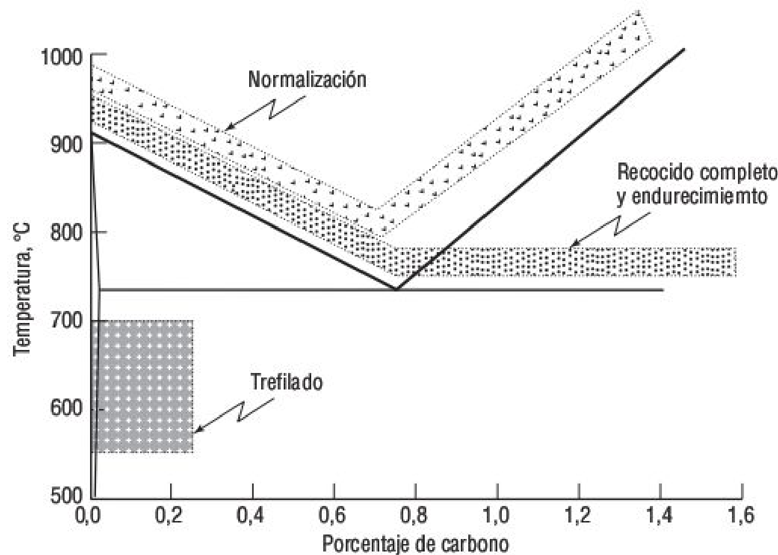


FIGURA 3.7 Temperaturas de tratamiento térmico.

cementita, dependiendo del contenido de carbono. La baja temperatura de enfriamiento asegura unas propiedades uniformes del acero así tratado. El acero obtenido será blando y dúctil.

El *recocido intermedio* se utiliza para tratar componentes endurecidos por mecanización y realizados con acero con un bajo contenido en carbono (es decir, menos del 0,25 por ciento de carbono). El material se calienta hasta unos 700°C y se mantiene a esa temperatura el tiempo suficiente como para que se produzca una recristalización de la fase de ferrita. Manteniendo la temperatura por debajo de 727°C, no se produce un cambio de fase entre ferrita y austenita, a diferencia de lo que ocurre en el recocido completo. Por tanto, el único cambio que se produce es un refinamiento del tamaño, la forma y la distribución de la estructura granular.

El *recocido de distensión* se emplea para reducir las tensiones residuales en los elementos fundidos, soldados y trabajados en frío, y en los componentes conformados en frío. El material se calienta a una temperatura de entre 600 y 650°C, se mantiene a esa temperatura durante cerca de una hora y luego se enfría lentamente en aire en reposo.

La *esferoidización* es un proceso de recocido utilizado para mejorar la capacidad de mecanizar o trabajar en frío el acero con alto contenido de carbono (es decir, más de un 0,6% de carbono). También mejora la resistencia a la abrasión. La cementita forma glóbulos (esferoides) dispersos por la matriz de ferrita.

3.3.2 Normalización

La normalización es similar al recocido con una ligera diferencia en la temperatura y en la velocidad de enfriamiento. El acero se normaliza calentándolo a unos 60°C (110°F) por encima de la línea de austenita y luego enfriándolo por convección natural. A continua-

ción, el material se enfría con aire. La normalización produce una microestructura uniforme de grano fino. Sin embargo, puesto que la velocidad de enfriamiento es mayor que la utilizada para el recocido completo, la velocidad de enfriamiento de componentes con espesores variables hace que esos componentes normalizados tengan menos uniformidad que la que puede conseguirse con el recocido. Puesto que las placas estructurales tienen un espesor uniforme, la normalización es un proceso bastante efectivo en su caso y da como resultado una gran resistencia del material a la fractura.

3.3.3 Endurecimiento

El acero se endurece calentándolo hasta una temperatura situada por encima del rango de transformación y manteniéndola hasta que se forme austenita. A continuación, el acero se enfría rápidamente sumergiéndolo en agua, salmuera o aceite, o rociando esos líquidos sobre él. Ese enfriamiento rápido "bloquea" el hierro en una estructura BCC, *martensita*, en lugar de permitir que se transforme en la estructura FCC de la ferrita. La martensita tiene una estructura muy dura y quebradiza. Puesto que el enfriamiento se produce más rápidamente en la superficie del material que se está endureciendo, dicha superficie será más dura y quebradiza que el interior del elemento, lo que da lugar a la existencia de características no homogéneas. A causa del rápido enfriamiento, el endurecimiento somete al acero a una serie esfuerzos. En ocasiones, estos esfuerzos provocan que las piezas de acero con ángulos pronunciados o muescas se rompan inmediatamente después del endurecimiento. Por tanto, el proceso de endurecimiento debe ir seguido de un proceso de templado.

3.3.4 Templado

La predominancia de martensita en el acero endurecido mediante un rápido enfriamiento da como resultado que la pieza sea excesivamente quebradiza. El templado o revenido se realiza para mejorar la ductibilidad y la tenacidad. La martensita es una estructura hasta cierto punto inestable. El calentamiento hace que los átomos de carbono se difundan desde la matensita para generar un precipitado de carburo, con formación de ferrita y cementita. Después del rápido enfriamiento, el acero se enfría unos 40°C y luego se vuelve a calentar por inmersión en aceite o en sales de nitratos. El acero se mantiene a esa temperatura elevada durante unas dos horas y luego se enfría en aire en reposo.

3.3.5 Ejemplo de tratamiento térmico

Intentando producir de forma económica aceros de alta resistencia y baja aleación, las empresas han desarrollado especificaciones para nuevos productos de acero, como el A913.[1] Este acero está disponible con esfuerzos de fluencia que van de 50.000 a 75.000 psi. Esas mejoradas propiedades del acero A913 se obtienen mediante un proceso de

[1] El acero ASTM-A913 no está contemplado en las especificaciones vigentes en España como un acero normalizado.

enfriado rápido y auto-revenido. Después de la última pasada de laminado en caliente con que se conforman las piezas, para la que la temperatura es típicamente de 850°C (1600°F), la superficie de la pieza se rocía intensamente con agua de refrigeración con el fin de enfriar rápidamente dicha superficie. El enfriamiento se interrumpe antes de que se vea afectado el núcleo del material. Después, las capas exteriores se templan a medida que el calor interno de la pieza fluye hacia la superficie. Después de la corta fase de enfriamiento, la temperatura de auto-revenido es de 600°C (1100°F) (Bouchard y Axmann, 2000).

3.4 Aleaciones del acero

Pueden utilizarse metales de aleación para modificar las características del acero. Según algunas fuentes, hasta el momento se han producido hasta 250.000 aleaciones diferentes del acero. De estas, más de 200 pueden utilizarse en aplicaciones de ingeniería civil. En lugar de analizar las características específicas de una serie de aleaciones seleccionadas, lo que haremos será presentar el efecto general de los distintos agentes de aleación. Estos agentes se añaden para mejorar una o más de las siguientes propiedades:

1. Endurecibilidad.
2. Resistencia a la corrosión.
3. Mecanizabilidad.
4. Ductilidad.
5. Resistencia.

En la Tabla 3.1 se presentan los agentes de aleación más comunes, su rango porcentual típico y sus efectos.

Alterando el contenido de los agentes de aleación y del carbono, y utilizando diferentes tratamientos térmicos, puede fabricarse acero con una amplia variedad de características. Estos distintos aceros se clasifican de la forma siguiente:

1. De baja aleación
   - De bajo contenido en carbono
   - Normal
   - Alta resistencia–baja aleación
   - Contenido medio de carbono
   - Termotratable
   - Alto contenido de carbono
   - De herramientas
2. De alta aleación
   - De herramientas
   - Inoxidable

Los aceros utilizados en proyectos de construcción son, predominantemente, aceros normales de contenido bajo o medio de carbono. El acero inoxidable se ha empleado en algunas aplicaciones altamente corrosivas, como las varillas de anclaje en los pavimentos de

hormigón y los componentes de acero en piscinas y alcantarillas. La Asociación norteamericana de industrias especiales del acero (SSINA, *Specialty Steel Industry of North America*) promueve el uso de acero inoxidable para elementos estructurales, en los casos en que la resistencia a la corrosión sea una consideración de diseño importante (SSINA, 1999).

TABLA 3.1 Agentes comunes de aleación del acero (Budinski, 1996) (Reimpreso con permiso de Prentice-Hall, Inc.)

	Rangos típicos en las aleaciones de acero (%)	Principales efectos
Aluminio	< 2	Facilita la nitruración. Restringe la espumación de los gránulos. Elimina el oxígeno durante el fundido del acero.
Azufre	< 0,5	Mejora la mecanizabilidad. Reduce la soldabilidad y la ductilidad.
Cobre	0,2 a 0,5	Facilita la aparición de una capa de óxido para aumentar la resistencia a la corrosión atmosférica.
Cromo	0,3 a 0,4	Aumenta la resistencia a la corrosión y a la oxidación. Mejora la endurecibilidad. Incrementa la resistencia a alta temperatura. Puede combinarse con carbono para formar microconstituyentes duros resistentes al desgaste.
Manganeso	0,3 a 2	Mejora la endurecibilidad. Facilita la adopción de una estructura austenítica. Se combina con el azufre para reducir sus efectos adversos.
Molibdeno	0,1 a 0,5	Facilita el refinado de los gránulos. Mejora la endurecibilidad. Mejora la resistencia a altas temperaturas.
Níquel	0,3 a 5	Facilita la adopción de una estructura austenítica. Mejora la endurecibilidad. Incrementa la tenacidad.
Silicio	0,2 a 2,5	Elimina el oxígeno durante la fabricación del acero. Mejora la tenacidad. Mejora la endurecibilidad.
Vanadio	0,1 a 0,3	Facilita el refinado de los gránulos. Mejora la endurecibilidad. Se combina con el carbono para formar microconstituyentes resistentes al desgaste.

El uso y control de agentes de aleación es uno de los factores más significativos en el desarrollo de aceros con mejores características de comportamiento. La especificación más antigua de acero utilizada en la construcción de edificios y puentes, publicada en 1900, no contenía ningún tipo de requisito químico. En 1991, ASTM publicó la especificación que controla el contenido de 10 elementos de aleación, además del carbono (Hassett, 2003).

3.5 Acero estructural

En estructuras de acero se utilizan elementos, planchas y perfiles laminados en caliente. El acero estructural se emplea para diversos tipos de elementos estructurales como columnas, vigas, encofrados, bastidores, armazones, sujeciones de puentes y otras aplicaciones estructurales (véase la Figura 3.8).

3.5.1 Tipos de acero estructural[2]

Debido al amplio uso del acero en muchas aplicaciones, existe una amplia variedad de sistemas para identificar o designar el acero, basados en su calidad, tipo y clase. Casi todos los países con capacidades industriales tienen especificaciones para el acero.[1] En Estados Unidos, hay varias asociaciones que desarrollan ese tipo de especificaciones, como la Sociedad de ingenieros de automoción (SAE, *Society of Automotive Engineers*), el Instituto americano del hierro y el acero (AISI, *American Iron and Steel Institute*) y la Sociedad americana de pruebas y materiales (ASTM, *American Society for Testing and Materials*). El sistema de designación más ampliamente utilizado se desarrolló conjuntamente por parte de la SAE y la AISI, basándose en la composición química (Key-to-Steel, 2005). Sin embargo, los materiales y productos utilizados en el diseño y construcción de edificios en Estados Unidos se designan, casi exclusivamente, según las especificaciones de la ASTM (Carter, 2004). Los nombres de especificación de la ASTM se forman por una letra, generalmente una A para materiales ferrosos, seguida de un número arbitrario que se asigna secuencialmente. Por ejemplo, ASTM A7 era una especificación para acero estructural escrita en 1900 y ASTM A992 se publicó en 1999 (Carter, 2004). El número de designación o especificación no contiene ninguna información útil, sirviendo tan sólo como referencia. Dentro de las especificaciones de la ASTM, los términos *calidad (grade)*, *tipo* y *clase* se emplean de manera incoherente. En algunas especificaciones de aceros de la ASTM, el término calidad identifica la resistencia a la fluencia, mientras que en otras, puede indicar los requisitos tanto de la composición química como de las propiedades mecánicas. ASTM y SAE han desarrollado el Sistema unificado de numeración (UNS, *Unified Numbering System*), (ASTM E527), basado en la composición química. Este sistema utiliza una letra para identificar en

[2] Puede encontrar las especificaciones sobre acero estructural vigentes en España en la Instrucción EAE y en el CTE-DB-SE-A.

TABLA 3.2 Designaciones, propiedades y composición del acero estructural de ASTM.

Tipo de acero	Designación ASTM		F_y (ksi)	F_u[1] (ksi)	Elongación[2]	Composición química típica (%)[1]									
						C	Cu[4]	Mn	P	S	Ni	Cr	Si	Mo	V
Carbono	A36		36	58–80	23	0,26	0,2	0,75	0,04	0,05					
	A53 Gr. B		35	60		0,25	0,4	0,95	0,05	0,045	0,4	0,4		0,15	0,08
	A500	Gr. B	42	58	23	0,3	0,18		0,05	0,63					
			46	58											
		Gr. C	46	62	21	0,27	0,18	1,4	0,05	0,063					
			50	62											
	A501		36	58	23	0,3	0,18		0,15	0,63					
	A529	Gr.50	50	65–100	19	0,27	0,2	1,35	0,04	0,05					
		Gr.55	55	70–100											
Alta resistencia, baja aleación	A572	Gr. 42	42	60	24	0,21	-	1,35	0,04	0,05					
		Gr. 50	50	65	21	0,23	-	1,35	0,04	0,05					
		Gr. 55	55	70		0,25	-	1,35	0,04	0,05					
		Gr. 60	60	75	18	0,26	-	1,35	0,04	0,05					
		Gr. 65	65	80	17	0,26	-	1,35	0,04	0,05					
	A618	Gr. I&II	50	70	22	0,2	0,2	1,35	0,04	0,05					
		Gr. III	50	65	22	0,23	-	1,35	0,04	0,05			0,3		
	A913	50	50	60	21	0,12	0,45	1,60	0,04	0,03	0,25	0,25	0,4	0,07	0,06
		65	65	80	17	0,35	0,35	1,60	0,04	0,03	0,25	0,25	0,4	0,07	0,06
	A992[3]		50–65	65	18	0,232	0,60	0,5–0,15	0,35	0,45	0,45			0,15	0,11
Resistente a la corrosión, alta resistencia, baja aleación	A242	50	50	70	18	0,15	0,2	1,0	0,15	0,05					
	A588		50	70	21	0,19	0,2–0,4	0,25–1,35	0,04	0,05	0,04	0,4–0,7			0,02–0,1

[1] Mínimo, a menos que se indique un rango u otro tipo de control.

[2] Elongación porcentual mínima (longitud nominal de dos pulgadas).

[3] En ASTM 992 se incluyen como obligatorias una fórmula de carbono equivalente y una relación máxima de 0,85 entre la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tracción.

[4] Diversas especificaciones de acero pueden incluir un mínimo de cobre para proporcionar resistencia a las condiciones climatológicas.



FIGURA 3.8 Acero estructural utilizado en columnas, vigas y suelos para el soporte estructural de un edificio.

sentido amplio la clase de aleaciones y un número de cinco dígitos para definir aleaciones específicas dentro de la clase.

En Estados Unidos se fabrican distintos tipos de acero estructural. En la Tabla 3.2 se resume información seleccionada de varias fuentes. El “Manual para la construcción con acero” del Instituto americano de construcción con acero (AISC, *American Institute of Steel Construction*) es una referencia excelente acerca de los tipos de acero utilizados en aplicaciones estructurales. Sin embargo, las mejores fuentes de información acerca de los aceros estructurales son las distintas especificaciones ASTM. Es preciso resaltar el hecho de que frecuentemente se incluyen requisitos adicionales, que dependen de la geometría del producto fabricado con un acero concreto.

Históricamente, hacia 1900, solo se empleaban dos tipos de acero estructural en Estados Unidos: A7 para puentes y A9 para edificios. Las especificaciones de estos materiales eran muy similares y, en 1938, se combinaron en una única especificación, la A7. La especificación para los aceros A7 y A9 estaba limitada a los requisitos para la resistencia a la tracción y al punto de fluencia; no se incluían especificaciones químicas. La composición química, en particular el contenido de carbono, comenzó a ser importante durante la década de 1950, a medida que los procesos de soldadura fueron ganando predominancia en el campo de las conexiones estructurales. En 1964, AISC adoptó cinco calidades de acero para aplicaciones estructurales. La especificación de diseño del factor de carga y resistencia para edificios con acero estructural, publicada por la AISC en 1999, identifica 15 designaciones de acero diferentes de la ASTM para aplicaciones estructurales.

3.5.2 Tipos de secciones

la Figura 3.9 ilustra varias formas de sección transversal utilizadas en aplicaciones estructurales. Estas formas se fabrican en distintos tamaños y se designan mediante las letras W, HP, M, S, C, MC y L. Las formas en W son doblemente simétricas y con alas anchas sustancialmente paralelas. Las formas HP también son de alas anchas siendo las alas y el alma del mismo espesor nominal y teniendo prácticamente la misma altura y anchura. Las formas S son doblemente simétricas y las superficies interiores de las alas presentan una pendiente de aproximadamente el 16,67%. Las formas M son todas aquellas formas doblemente simétricas que no pueden clasificarse como formas W, S o HP. Las formas C son acanalamientos cuyas superficies internas de las alas tienen una pendiente de aproximadamente el 16,67%. Las formas MC son acanalamientos que no pueden clasificarse como formas C. Las formas L son formas angulares cuyas alas pueden tener igual longitud o no. Además de estas formas, hay disponibles otros elementos estructurales con secciones transversales distintas, como secciones en T, secciones tablestacado y raíles, como se muestra en la Figura 3.9.

Las formas W, M, S, HP, C y MC se designan mediante una letra seguida de dos números separados por un signo ×. La letra indica la forma, mientras que los dos números indican la altura nominal y el peso por unidad lineal de longitud. Por ejemplo, W 44 × 335 indica una forma W con una altura nominal de 44 pulgadas y un peso de 335 libras/pie lineal. Los ángulos se designan mediante la letra L seguida de tres números que indican las dimensiones del ala y el espesor en pulgadas, como por ejemplo, L 4 × 4 × 1/2. Las dimensiones de estos elementos estructurales están controladas por las especificaciones ASTM A6/A6M.[3]

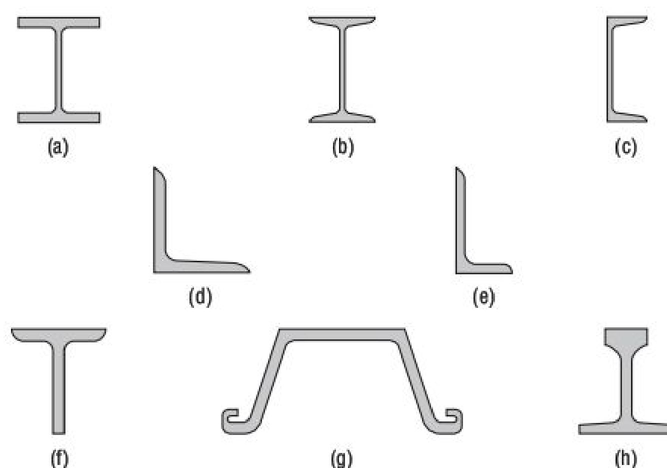


FIGURA 3.9 Secciones transversales comúnmente utilizadas en aplicaciones estructurales: (a) ala ancha (formas W, HP y M), (b) en I (forma S), (c) acanaladas (formas C y MC), (d) angular de alas iguales (forma L), (e) angular de alas de distinta longitud (forma L), (f) en T, (g) tablestacado y (h) rail.

[3] Las especificaciones sobre nomenclatura, geometría y dimensiones de las series de perfiles normalizados en España están disponibles en la Instrucción EAE.

Las formas W se utilizan comúnmente como vigas y columnas, las formas HP se emplean como pilotes de carga y las formas S como vigas o pilares. También se pueden formar secciones compuestas soldando elementos con diferentes formas para usarlos en diversas aplicaciones estructurales. Las secciones de tablestacado se conectan entre sí y se utilizan como muros de contención.

TABLA 3.3 Formas estructurales ASTM aplicables.

Tipo de acero	Designación ASTM		Formas estructurales aplicables									
										HSS		
			W	M	S	HP	C	MC	L	Recto	Redondo	Conducto acero
Carbono	A36		▒	■	■	■	■	■	■			
	A53 Gr. B											■
	A500	Gr. B-42									■	
		Gr. B-46								■		
		Gr. C-46									▒	
		Gr. C-50								▒		
	A501									▒	▒	
	A529	Gr. 50	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
		Gr. 55	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
Alta resistencia, baja aleación	A572	Gr. 42	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
		Gr. 50	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
		Gr. 55	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
		Gr. 60	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
		Gr. 65	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
	A618	Gr. I&II								▒	▒	
		Gr. III								▒	▒	
	A913	50	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
		65	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
	A992		■									
Resistente a la, corrosión, alta resistencia, baja aleación	A242	50	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
	A588		▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒			
	A847									▒	▒	

■ = Especificación de material preferida.
▒ = Otra especificación de material aplicable, la disponibilidad del cual debe confirmarse antes de especificarlo.
☐ = Especificación del material no aplicable.
HSS = hollow structural shape (forma estructural hueca).

TABLA 3.4 Especificaciones ASTM aplicables para placas y varillas.

Tipo de acero	Designación ASTM	f_y o calidad	Rangos de espesor (pulgadas)									
			≤ 0,75	>0,75–1,25	1,25–1,5	1,5–2	2–2,5	2,5–4	4–5	5–6	6–8	>8
Carbono	A36	32										
		36										
	A529	Gr. 50		b	b	b	b					
		Gr. 55		b	b							
Alta resistencia Baja aleación	A572	Gr. 42										
		Gr. 50										
		Gr. 55										
		Gr. 60										
		Gr. 65										
Resistente a la corrosión, Alta resistencia, Baja aleación	A242	42										
		46										
		50										
	A588	42										
		46										
		50										
Aleación con enfriamiento rápido y revenido	A514[a]	90										
		100										
Baja aleación con enfriam. rápido y revenido	A852	70										

■ = Especificación del material pereferido.
▒ = Otra especificación de material aplicable, la disponibilidad del cual debe confirmarse antes de especificarlo.
□ = Especificación de material no aplicable.
a = Disponibles sólo como placas.
b= Aplicable sólo para varillas con un espesor por encima de una pulgada.

Las Tablas 3.3 y 3.4 resumen las especificaciones/asignaciones ASTM aplicables para aceros estructurales y placas y varillas, respectivamente (Carter, 2004). Estas tablas sirven solo como guía, la información específica debe consultarse en las especificaciones aplicables a cada material y aplicación. En particular, la dimensión y aplicación de un elemento puede afectar a ciertas cuestiones sutiles relativas a la selección de materiales que no se cubre en estas tablas. En general, los materiales identificados como "preferidos" en las tablas suelen estar disponibles con carácter general en el mercado. Los otros identificados como "otros materiales aplicables" pueden estar o no disponibles tan fácilmente.

3.5.3 Aceros especiales en aplicaciones estructurales.

A medida que mejora la capacidad de refinar el acero, es posible fabricar productos especiales con un coste lo suficientemente económico como para poder utilizarlos en proyectos de construcción. La Administración Federal de autopistas de Estados Unidos, la Armada de Estados Unidos y AISI han adoptado un papel fundamental en el desarrollo y aplicación de aceros de alta calidad. Estos aceros se definen como materiales que poseen la combinación óptima de propiedades requeridas para construir estructuras económicas que sean a la vez seguras y resistentes a lo largo de toda su vida útil (Lane *et al*, 1998). Uno de los productos desarrollados como parte de estos programas son los aceros de alta calidad HPS.[4] Actualmente hay disponibles dos productos: HPS 50W y HPS 70W. Son aceros para intemperie que forman una barrera anticorrosión en la superficie cuando se los expone por primera vez al aire libre. Esta superficie resiste la corrosión ulterior y reduce las necesidades de mantenimiento. HPS 70W tiene propiedades de resistencia a la tracción mejores que el acero tradicionalmente empleado en la construcción de puentes, de modo que con este nuevo acero los puentes se pueden diseñar con una menor cantidad de material. Estos ahorros se ven disminuidos en cierta medida por el propio coste del material, pero de todos modos existe una reducción neta en los costes de construcción. Los requisitos de resistencia del HPS 70W son una resistencia de fluencia de 70.000 psi, una resistencia a la tracción de 85.000 a 110.000 psi y una elongación del 19% (longitud nominal de dos pulgadas). Además, el acero HPS debe superar una serie de pruebas de impacto. El HPS 70W se fabrica con requisitos muy precisos y exhaustivos de contenidos de agentes de aleación, como se muestra en la Tabla 3.5 (ISG Plate, 2003).

Comparando los requisitos químicos de la Tabla 3.5 con los de la Tabla 3.2, podemos ver que el HPS 70W tiene requisitos químicos más exhaustivos, un menor contenido de carbono y controles más precisos del fósforo y el azufre, que son elementos de aleación perjudiciales. El menor contenido de carbono mejora la soldabilidad del acero.

Las empresas han reconocido las ventajas de diseñar con estos aceros de alta calidad. El primer puente con acero HPS entró en servicio en 1997. En abril de 2002, ya había más de 150 puentes con HPS ya construidos o que estaban en la etapa de diseño y construcción (FHWA, 2002).

[4] Los aceros HPS no están contemplados en la especificaciones vigentes en España como aceros normalizados.

TABLA 3.5 Requisitos químicos del HPS 70W

Elemento	Composición (% de peso)
Carbono	0,11 máx.
Manganeso	1,10–1,35
Fósforo	0,020 máx.
Azufre*	0,006 máx.
Silicio	0,30–0,50
Cobre	0,25–0,40
Níquel	0,25–0,40
Cromo	0,45–0,70
Molibdeno	0,02–0,08
Vanadio	0,04–0,08
Aluminio	0,01–0,04
Nitrógeno	0,015 máx.

*Todo el HPS 70 debe ser tratado con calcio para control de sulfuros.

El deseo de mejorar la apariencia y la durabilidad de las estructuras de acero ha hecho que se despierte interés por el desarrollo de elementos estructurales de acero inoxidable. Hace mucho tiempo que la durabilidad del acero inoxidable ha sido reconocida de forma generalizada, pero el coste de ese material era prohibitivo. La capacidad del acero inoxidable para resistir a la corrosión descansa en su alto contenido en cromo. Mientras que los aceros comunes para uso estructural tienen entre un 0,3 y un 0,4 por ciento de cromo, el acero inoxidable, por definición, contiene más del 10%. En las aplicaciones estructurales pueden emplearse hasta cinco calidades AISI de acero inoxidable (SSINA, 1999):

- 304: el acero inoxidable más común, que contiene un 18% de cromo y un 8% de níquel. Tiene una excelente resistencia a la corrosión y una excelente conformabilidad.
- 316: similar al 304, pero con la adición de entre un 3 y 4% de molibdeno para tener aún más resistencia a la corrosión. Generalmente, se especifica para entornos altamente corrosivos, como las atmósferas industriales, químicas y costeras.
- 409: una aleación simple de cromo con entre un 11 y un 12% de dicho material. Se utiliza principalmente en aplicaciones de interiores.
- 410–3: una aleación de fase dual con microcontrol de los elementos de aleación, que permite la soldadura en hasta 1,25 pulgadas.
- 2205: una estructura dúplex con partes aproximadamente iguales de austenita y ferrita. Presenta una excelente resistencia a la corrosión y aproximadamente el doble de resistencia a la fluencia que los aceros de calidad convencional.

En la Tabla 3.6 se resumen las propiedades químicas y de resistencia a la tracción de estos aceros.

TABLA 3.6 Propiedades de los aceros inoxidables empleados en aplicaciones estructurales.

Tipo AISI	F_y (ksi)	F_u (ksi)	% Elong*	Componentes (porcentaje máximo tíico en peso)									
				C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si	Ti
304	31,2	73,2	70	0,08	18–20	2			8–10,5	0,045	0,03	1	
316	29,7	74,7	40	0,08	16–18	2				0,045	0,03	0,75	
409	34,8	65,3	25	0,08	11,13	1				0,045	0,045	1	0,75
410	178	221	45	0,15	12,5	1				0,04	0,03		
2205	74,7	110	35	0,02	22,4	0,7	3,3	0,16	5,8	0,25	0,001	0,4	

*El tanto por ciento de elongación es el porcentaje de deformación plástica en la fractura (longitud nominal de dos pulgadas), mínimo.

3.6 Productos de sujeción

Entre los productos de sujeción se incluyen (Carter, 2004):

- Pernos convencionales.
- Pernos de torsión para control de tensión.
- Tuercas.
- Arandelas.
- Indicadores directos de tensión de tipo arandela compresible.
- Varillas de anclaje.
- Varillas roscadas.
- Elementos estructurales de acero forjado.

En la Tabla 3.7 se resumen las especificaciones ASTM aplicables para cada tipo de elemento de sujeción (Carter, 2004). Los pernos de alta resistencia tienen una resistencia a la tracción superior a 100.000 psi. Los pernos comunes tienen una resistencia a la tracción de 60.000 psi. El material preferido para las varillas de anclaje, el F1554 de calidad 36, tiene un esfuerzo de fluencia de 36.000 psi y una resistencia de fractura de entre 58.000 a 80.000 psi. A36, con una resistencia de fluencia de 36.000 psi, es el materia preferido para las varillas roscadas. Las tuercas, arandelas e indicadores directos de tensión se fabrican con materiales que no tienen una resistencia mínima requerida.

Las conexiones estructurales se realizan mediante remachado, empernado o soldadura. Las conexiones remachadas se utilizaban ampliamente en el pasado, pero la tecnología moderna de empernado ha hecho que el remachado quede obsoleto. Las conexiones empernadas pueden ser de impacto, pretensionadas o antideslizamiento (Miller, 2001). Las uniones de impacto se realizan golpeando unas cuantas veces con una llave de impacto o utilizando una llave de cola ordinaria para hacer que los elementos contacten firmemente. Las uniones pretensionadas requieren apretar el perno con un esfuerzo de tracción significativo y el correspondiente esfuerzo de compresión en los elementos conectados. Se emplean cuatro métodos para garantizar que el perno esté apretado con un nivel de tensión adecuado: vuelta de tuerca, llave calibrada, pernos de torsión para control de tensión e indicadores directos de tensión. Los pernos en las uniones antideslizamiento también se instalan con unos requisitos de pretensionado, pero estas uniones tienen “superficies de contacto que han sido preparadas para proporcionar una resistencia calculable al deslizamiento”. Cuando se somete a carga la unión, los esfuerzos pueden transmitirse a través de la unión gracias al rozamiento existente entre los elementos. Sin embargo, si se produce un deslizamiento, los pernos se verán sometidos a una fuerza de cizallamiento, además de a los esfuerzos de tensión de la propia instalación; de ahí la necesidad de emplear pernos de alta resistencia.

TABLA 3.7 Especificaciones ASTM aplicables a elementos de sujeción estructurales.

Designación ASTM		F_y Esfuerzo de fluencia (ksi)	F_u Esfuerzo de tracción[a] (ksi)	Rango de diámetros (pulg.)	Pernos de alta resistencia	Pernos comunes	Tuercas	Arandelas	Indicadores direc-tos de tensión	Varillas roscadas	Varillas de anclaje: Con gancho	Varillas de anclaje: Con cabeza	Varillas de anclaje: Con rosca y tuerca
A325		-	105	> 1–1,5	■								
		-	120	0,5–1,5	■								
A490		-	150	0,5–1,5	■								
F1852		-	105	1,125	■								
		-	120	0,5–1	■								
A194 Gr. 2H		-	-	0,25–4		▒							
A563		-	-	0,25–4		■							
F436[b]		-	-	0,25–4			■						
F959		-	-	0,5–1,5				■					
A36		36	58–80	<10					■				
A193 Gr. B7		-	100	>4–7						■	▒		▒
		-	115	>2,5–4						▒	▒		▒
		-	125	≤2,5						▒	▒		▒
A307	Gr. A	-	60	0,25–4			■					▒	
	Gr. C	-	58–80	0,25–4						▒	▒		▒
A354 Gr. BD		-	140	2,5–4						▒	▒	▒	▒
			150	0,25–2,5						▒	▒	▒	▒
A449		-	90	1,5–3	c					▒	▒	▒	▒
			105	1,125–1,5	c					▒	▒	▒	▒
			120	0,25–1	c					▒	▒	▒	▒
A572	Gr. 42	42	60	<6						▒	▒		▒
	Gr. 50	50	65	<4						▒	▒		▒
	Gr. 55	55	70	<2						▒	▒		▒
	Gr. 60	60	75	<1,25						▒	▒		▒
	Gr. 65	65	80	<1,25						▒	▒		▒
A588		42	63	>5–8						▒	▒		▒
		46	67	>4–5						▒	▒		▒
		50	70	<4						▒	▒		▒
A687		105	150 max	0,625–3						▒	▒		▒
F1554	Gr. 36	36	58–80	0,25–4							■	■	■
	Gr. 55	55	75–95	0,25–4							▒	▒	▒
	Gr. 105	105	125–150	0,25–3							▒	▒	▒
	■	= especificación del material preferido.											
	▒	= Otra especificación de material aplicable, la disponibilidad del cual debe confirmarse antes de especificarlo.											
		= Especificación de material no aplicable.											

- indica que no se ha incluido un valor en la especificación del material. [a] Valores mínimos a menos que se indique un rango o un máximo. [b] Para algunas tareas de empernado de acero con acero se aplican requisitos especiales a las arandelas; compruebe los documentos de diseño. [c] LRFD impone limitaciones al uso de pernos ASTM A449.

3.7 Armaduras de acero

Puesto que el hormigón tiene una resistencia a la tracción despreciable, los elementos estructurales de hormigón sujetos a esfuerzos de flexión y de tracción deben reforzarse. Pueden utilizarse refuerzos convencionales o pretensionados, dependiendo del diseño concreto. En los refuerzos convencionales, los esfuerzos fluctúan con las cargas a las que se somete la estructura. Esto no impone ningún requisito especial al acero. Por otro lado, con los refuerzos pretensionados el acero está sometido a una tensión continua. Cualquier relajación de esa tensión reducirá la efectividad del refuerzo. Por ello, son necesarios aceros especiales.

Las armaduras de acero se fabrican en tres formas: *barra de acero normal, barra de acero corrugado* y *mallas de alambre normales y corrugadas*. Las barras de acero normal son redondeadas sin deformaciones en la superficie. Proporcionan solo una sujeción limitada con el hormigón y, por tanto, normalmente no se utilizan en secciones sometidas a esfuerzos axiales y de flexión. Las barras de acero corrugado tienen protusiones (deformaciones) en la superficie, como se muestra en la Figura 3.10, por lo que garantizan un buen contacto entre la barra y el hormigón. La superficie deformada de la barra impide el deslizamiento, con lo que el hormigón y el acero pueden trabajar como una sola unidad. Las mallas de alambre son hojas planas en las que los alambres



FIGURA 3.10 Armaduras de acero utilizadas para reforzar columnas PCC.

TABLA 3.8 Varillas de armadura de tamaño estándar según la especificación ASTM A615*.

		Dimensiones nominales ***			Requisitos de deformación (mm)****		
Número de designación varilla**	Masa nominal (kg/m)	Diámetro (mm)	Área sección transversal (mm^2)	Perímetro (mm)	Distancia máxima promedio	Altura mínima promedio	Separación máx.*****
10 [3]	0,560	9,5	71	29,9	6,7	0,38	3,6
13 [4]	0,994	12,7	129	39,9	8,9	0,51	4,9
16 [5]	1,552	15,9	199	49,9	11,1	0,71	6,1
19 [6]	2,235	19,1	284	59,8	13,3	0,97	7,3
22 [7]	3,042	22,2	387	69,8	15,5	1,12	8,5
25 [8]	3,973	25,4	510	79,8	17,8	1,27	9,7
29 [9]	5,059	28,7	645	90,0	20,1	1,42	10,9
32 [10]	6,404	32,3	819	101,3	22,6	1,63	12,4
36 [11]	7,907	35,8	1006	112,5	25,1	1,80	13,7
43 [14]	11,38	43,0	1452	135,1	30,1	2,16	16,5
57 [18]	20,24	57,3	2581	180,1	40,1	2,59	21,9

*Copyright ASTM. Reimperso con su permiso.

**Los números de varilla aproximan el número de milímetros del diámero nominal de la varilla. [Los números de varilla están basados en el número de octavos de pulgada del diámetro nominal de la varilla.]

***Las dimensiones nominales de una varilla corrugada son equivalentes a las de una varilla redonda normal que tenga el mismo peso por metro que la corrugada.

****Requisitos para las protusiones en la superficie de la varilla.

*****Cuerda 12.5% del perímetro nominal.

se entrecruzan en ángulo recto. Las mallas de alambre normal se anclan en el hormigón en las intersecciones soldadas, mientras que las mallas de alambre corrugado se anclan gracias a las deformaciones y las intersecciones soldadas.

Las barras de acero corrugado se emplean en vigas de hormigón, losas, pilares, muros, cimientos, pavimentos y otras estructuras de hormigón, así como en construcciones de mampostería. Las mallas de alambre corrugadas se utilizan en algunas losas y pavimentos de hormigón, principalmente para poder resistir las temperaturas y los esfuerzos de contracción. Las mallas de alambre soldadas pueden ser más económicas de colocar y permiten, por tanto, una distancia menor entre varillas que la que se puede conseguir, a efectos prácticos, con varillas individuales.

El acero para armaduras se produce en los tamaños estándar mostrados en la Tabla 3.8. Las varillas están hechas de cuatro tipos de acero: A615 (palanquilla), A616 (rail), A617 (eje) y A706 (baja aleación), como se muestra en la Tabla 3.9. El acero A615 es el más ampliamente utilizado. El acero A706 se emplea a menudo cuando la armadura de acero debe soldarse al acero estructural. Las armaduras de acero se fabrican en cuatro calidades: 40, 50, 60 y 75, con esfuerzos de fluencia de 276 MPa, 345 MPa, 414 MPa y 517 MPa (40 ksi, 50 ksi, 60 ksi y 75 ksi), respectivamente.

TABLA 3.9 Tipos y propiedades de las varillas de armadura de acuerdo con la ASTM (Somayaji, 2001). Reimpreso con permiso de Pearson Education, Inc.

Designación ASTM	Tipo	Calidad	Resistencia a la atracción min., MPa (ksi)	Resistencia de fluencia* Min., MPa (ksi)	Disponibilidad de tamaños (No.)
A615	Varillas de acero de palanquilla (normales y corrugadas)	40	483 (70)	276 (40)	3–6
		60	620 (90)	414 (60)	3–18
		75	689 (100)	517 (75)	11–18
A616	Acero de rail (normal y corrugado)	50	552 (80)	345 (50)	3–11
		60	620 (90)	474 (60)	3–11
A617	Acero de eje (normal y corrugado)	40	483 (70)	276 (40)	3–11
		60	620 (90)	414 (60)	3–11
A706	Acero de baja aleación, varillas corrugadas	60	552 (80)	414–538 (60–78)	3–18

*Cuando el acero no tiene un punto de fluencia bien definido, la resistencia de fluencia es el esfuerzo correspondiente a una deformación de 0,005 m/m (extensión del 0,5%) para las calidades 40, 50 y 60, y una deformación de 0,0035 m/m (extensión del 0,35%) para la calidad 75 de los aceros A615, A616 y A617. Para el acero A706, el punto de calidad se determina para una deformación de 0,0035 m/m.

El hormigón pretensado requiere alambres especiales, alambres trenzados, cables y varillas. El acero para refuerzo de hormigón pretensado presenta una alta resistencia y bajas propiedades de relajación. Para este propósito se utilizan aceros con alto contenido de carbono y aceros de aleación de alta resistencia. La especificación ASTM A416 y la especificación AASHTO M203 establecen las propiedades de los refuerzos para hormigón pretensado.[5] Estas especificaciones definen los requisitos para un cable trenzado de acero sin revestimiento y de siete hilos. Las especificaciones permiten dos tipos de acero: distensionado (relajación normal) y de baja relajación. La relajación hace referencia al porcentaje de reducción de esfuerzo que se produce cuando se aplica una cantidad constante de deformación a lo largo de un periodo de tiempo prolongado. Tantos los aceros distensionados como los de baja relajación pueden especificarse como de calidad 250 o de calidad 270, con una resistencia a la fractura de 1725 MPa (250 ksi) y 1860 MPa (270 ksi), respectivamente. Las especificaciones para esta aplicación están basadas únicamente en las propiedades mecánicas; la química de los alambres no es pertinente a esta aplicación. Después de trenzados, los cables de baja relajación se someten a un tratamiento termomecánico continuo, con el fin de conseguir las propiedades mecánicas requeridas. La Tabla 3.10 muestra las propiedades requeridas para un cable trenzado de siete alambres.

TABLA 3.10 Propiedades requeridas para un cable trenzado de siete alambres.

	Distensionado		Baja relajación	
Propiedad	**Calidad 250**	**Calidad 270**	**Calidad 250**	**Calidad 270**
Resistencia de rotura,* MPa (ksi)	1725 (250)	1860 (270)	1725 (250)	1860 (270)
Resistencia de fluencia (extensión 1%)	85% de resistencia de rotura		90% de resistencia de rotura	
Elongación (porcentaje mín.)	3,5		3,5	
Relajación** (porcentaje máx.)				
Carga = 70% mín. resistencia ruptura	—		2,5	
Carga = 80% mín. resistencia de rotura	—		3,5	

*La resistencia de rotura es el esfuerzo requerido para romper uno o más alambres.

**La relajación es la reducción de esfuerzo que se produce cuando se aplica una deformación constante durante un periodo de tiempo prolongado. La especificación es para una duración de la carga de 1000 horas a una temperatura de prueba de 20 ± 2°C (68 ± 3°F).

[5] Las especificaciones sobre armaduras de acero pasivas y pretensadas vigentes en España están disponibles en la Instrucción EHE.

3.8 Pruebas mecánicas del acero

Hay disponibles muchas pruebas para evaluar las propiedades mecánicas del acero. Esta sección resume algunas de las pruebas de laboratorio comúnmente usadas para determinar las propiedades requeridas a la hora de especificar un producto. Las probetas de ensayo pueden tener diversas formas, como barra, tubo, alambres, sección plana y probeta entallada, dependiendo del propósito de la prueba y de la aplicación.

Ciertos métodos de fabricación, como la flexión, el conformado y el soldado, o ciertas operaciones que implican calentamiento, pueden afectar a las propiedades del material bajo prueba. Por tanto, las especificaciones del producto cubren la etapa de fabricación en la que se realizan las pruebas mecánicas. Las propiedades determinadas mediante pruebas antes de fabricar el material pueden no ser necesariamente representativas del producto después de que este haya sido completamente fabricado. Asimismo, las fallas en la probeta o una preparación o mecanización inapropiadas de la misma darán resultados erróneos (ASTM A370).

3.8.1 Prueba de tensión

La prueba de tensión (ASTM E8) del acero se realiza para determinar la resistencia de fluencia, el punto de fluencia, la resistencia de fractura (tracción), la elongación y la reducción de área. Típicamente, la prueba se realiza a temperaturas comprendidas entre 10°C y 35°C (50°F y 95°F).

La probeta de ensayo puede tener su tamaño completo o ser mecanizada para que adopte una cierta forma, según se prescriba en las especificaciones de producto del material que se esté probando. Es deseable utilizar un área transversal pequeña y situada en la parte central de la probeta, para garantizar que la fractura se produzca dentro de la longitud nominal. Pueden emplearse diversos tipos de formas de sección transversal o perfiles, redondeados y rectangulares, como se ilustra en la Figura 3.11. Se pueden utilizar probetas de tipo placa, lámina, varilla redondeada, alambre y tubo. En muchos casos, se usa una probeta redonda con un diámetro de 12,5 mm (1/2 pulgada). Para la mayoría de las probetas de varilla redondeada, la longitud nominal con la que se mide la elongación suele ser normalmente igual a cuatro veces el diámetro.

Se pueden usar diversos tipos de abrazaderas para fijar las probetas, dependiendo de su forma. En todos los casos, el eje de la probeta de ensayo debe situarse en el centro del cabezal de la máquina de prueba, para garantizar que se apliquen esfuerzos de tracción axiales dentro de la longitud nominal sin que se produzcan flexiones. Se utilizará un extensímetro con una galga (Figura 1.25) o un LVDT (Figura 1.29) para medir la deformación de la probeta. La prueba se lleva cabo aplicando una carga axial a la probeta a una velocidad especificada. La Figura 3.12 muestra la realización de una prueba de tracción sobre una probeta de acero redondeado, utilizando un extensímetro LVDT para medir la deformación.



FIGURA 3.11 Probetas para ensayos de tensión con sección transversal redondeada y rectangular.



FIGURA 3.12 Prueba de tensión en una probeta de acero redondeado donde se muestran las abrazaderas y un extensímetro con un LVDT.

Como se ha explicado en el Capítulo 1, el acero dulce tiene una relación esfuerzo –deformación distintiva (Figura 3.13). Aquí, se muestra una respuesta lineal elástica hasta el límite de proporcionalidad. Cuando el esfuerzo se incrementa más allá de ese límite, el acero alcanza su punto de fluencia, en cuyo momento la deformación se incrementará sin que se aumente el esfuerzo; de hecho, el esfuerzo se reducirá ligeramente. Cuando la tensión se incrementa más allá del punto de fluencia, la deformación aumenta según una relación no lineal hasta el punto de fallo.

Observe que la disminución de esfuerzo después del pico no implica una disminución de la resistencia. De hecho, el esfuerzo real continúa incrementándose hasta el fallo. La razón para la disminución aparente es que se forma un cuello en la probeta



FIGURA 3.13 Comportamiento típico esfuerzo-deformación del acero dulce.

de acero, que provoca una reducción apreciable en el área de la sección transversal. La forma tradicional o de ingeniería para calcular el esfuerzo y la deformación utiliza el área transversal y la longitud nominal originales. Si se calculan los esfuerzos y las deformaciones basándose en el área transversal y la longitud nominal instantáneas, se obtiene una *curva real esfuerzo–deformación*, que es diferente de la *curva de cálculo de esfuerzo–deformación* (Figura 3.13).

Como se muestra en la Figura 3.13, el esfuerzo real es mayor que el esfuerzo de cálculo, debido a la menor área de sección transversal en el cuello del elemento. Asimismo, la deformación verdadera es mayor que la de cálculo, puesto que el incremento de longitud en la vecindad del cuello es mucho mayor que el que se produce fuera del mismo. La probeta experimenta la deformación más grande (contracción de la sección transversal e incremento de la longitud) en las regiones más próximas al cuello, debido a la distribución no uniforme de la deformación. El gran incremento de longitud en el cuello aumenta la deformación real en gran medida, porque la definición de dicha deformación es función del cociente entre la variación de longitud y una longitud nominal infinitesimal. Al reducir la longitud nominal hasta un tamaño infinitesimal e incrementar la longitud debida a la localización en el cuello, el numerador del cociente se incrementa, al mismo tiempo que el denominador continúa siendo pequeño, lo que da como resultado un incremento significativo del cociente de ambos números. Observe que, al calcular la deformación real, puede utilizarse una pequeña longitud nominal en el cuello, dado que las propiedades del material (como por ejemplo la sección trasversal) en ese punto representan las verdaderas propiedades del material. Sin embargo, en diversas aplicaciones prácticas, se utilizan los esfuerzos y deformaciones de cálculo en lugar de los reales.

Los aceros con distintos contenidos de carbono presentan diferentes relaciones esfuerzo–deformación. Al incrementar el contenido de carbono del acero, se incrementa

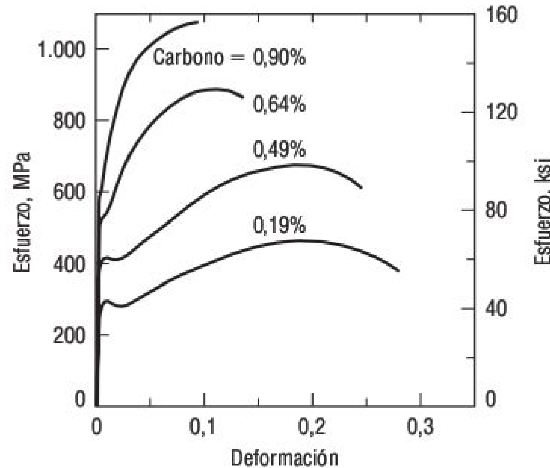


FIGURA 3.14 Diagramas esfuerzo-deformación para la tracción de varillas de acero laminadas en caliente para distintos contenidos de carbono.

el esfuerzo de fluencia y se reduce la ductilidad. La Figura 3.14 muestra el diagrama de esfuerzo–deformación para la tracción de varillas de acero laminadas en caliente, con un contenido de carbono comprendido entre el 0,19% y el 0,90%. Al incrementar el contenido de carbono del 0,19% al 0,90%, aumenta el esfuerzo de fluencia de 280 MPa a 620 MPa (40 ksi a 90 ksi). Asimismo, este incremento en el contenido de carbono reduce la deformación de fractura desde unos 0,27 m/m a 0,09 m/m. Observe que el incremento de contenido de carbono no modifica el módulo de elasticidad.

Problema de ejemplo 3.2

Una varilla de aleación de acero de 100 mm de longitud y una sección transversal rectangular de 10 mm × 40 mm está sometida a una tensión con una carga de 89 kN y experimenta un incremento de longitud de 0,1 mm. Si este incremento de longitud es completamente elástico, calcule el módulo de elasticidad de la aleación de acero.

Solución

$$\sigma = \frac{89000}{0{,}01 \times 0{,}04} = 0{,}2225 \times 10^9 \text{ Pa} = 0{,}2225 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon = \frac{0{,}1}{100} = 0{,}001 \text{ mm/mm}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{0{,}2225}{0{,}001} = 222{,}5 \text{ GPa}$$

Problema de ejemplo 3.3

Una probeta de acero se somete a una prueba de resistencia a la tracción. La probeta tiene 1 pulgada de ancho y 0,5 pulgadas de espesor en la región de prueba. Monitorizando el indicador de carga de la máquina de prueba, se ve que la probeta alcanza un punto de fluencia para una carga de 36 kips y el punto de fractura para 48 kips.

a. Determine los esfuerzos de tracción para fluencia y para fractura.
b. Si la longitud nominal original era de 4 pulgadas, estime la longitud nominal cuando se somete la probeta a un esfuerzo igual a 1/2 del esfuerzo de fluencia.

Solución

a. Esfuerzo de fluencia $(\sigma_y) = 36 / (1 \times 0{,}5) = 72$ ksi

Esfuerzo de fractura $(\sigma_f) = 48 / (1 \times 0{,}5) = 96$ ksi

b. Suponemos $E = 30 \times 10^6$ psi

$$\varepsilon = \left(\tfrac{1}{2}\right)\sigma_y / E = \left(\tfrac{1}{2}\right) \times 72 \times 10^3 / (30 \times 10^6) = 0{,}0012 \text{ pulg./pulg.}$$

$$\Delta L = L\varepsilon = 4 \times 0{,}0012 = 0{,}0048 \text{ pulg.}$$

Longitud nominal final $= 4 + 0{,}0048 = 4{,}0048$ pulgadas

■

Generalmente, se asume que el acero es un material homogéneo e isotrópico. Sin embargo, a la hora de fabricar elementos estructurales, la forma final puede obtenerse mediante laminado en frío. Esto hace, esencialmente, que el acero sufra deformaciones plásticas, variando el grado de deformación a lo largo del elemento. Como se ha explicado en el Capítulo 1, la deformación plástica provoca un incremento de la resistencia de fluencia y una reducción de la ductilidad. La Figura 3.15 ilustra que las propiedades medidas varían dependiendo de la orientación de la muestra respecto al eje de laminado (Hassett, 2003). Por tanto, a la hora de evaluar las propiedades mecánicas del acero, es necesario especificar cómo se obtuvo la muestra.

3.8.2 Prueba de torsión

La prueba de torsión (ASTM E143) se utiliza para determinar el módulo de rigidez de los materiales estructurales. El módulo de rigidez se emplea en el diseño de elementos sujetos a torsión, como ejes rotatorios y muelles helicoidales de compresión. En esta prueba, se carga una probeta cilíndrica o tubular, bien de forma incremental o continua, aplicando un par externo para provocar una torsión uniforme dentro de la longitud nominal (Figura 3.16). Durante la prueba, se miden la intensidad del par aplicado y el ángulo correspondiente de torsión. La Figura 3.17 muestra la curva esfuerzo–deformación para torsión. El módulo de rigidez es la relación entre el esfuerzo máximo

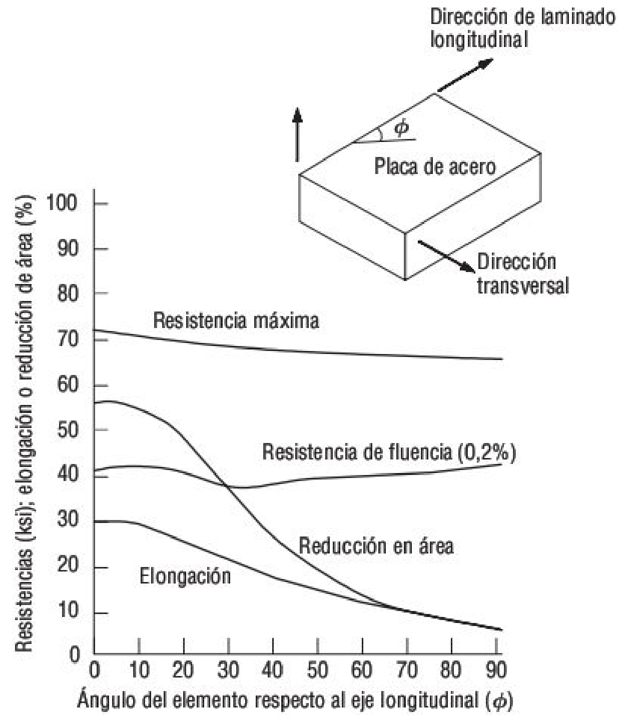


FIGURA 3.15 Ejemplo de efecto de la orientación de la probeta sobre las propiedades medidas de resistencia a la tracción del acero.

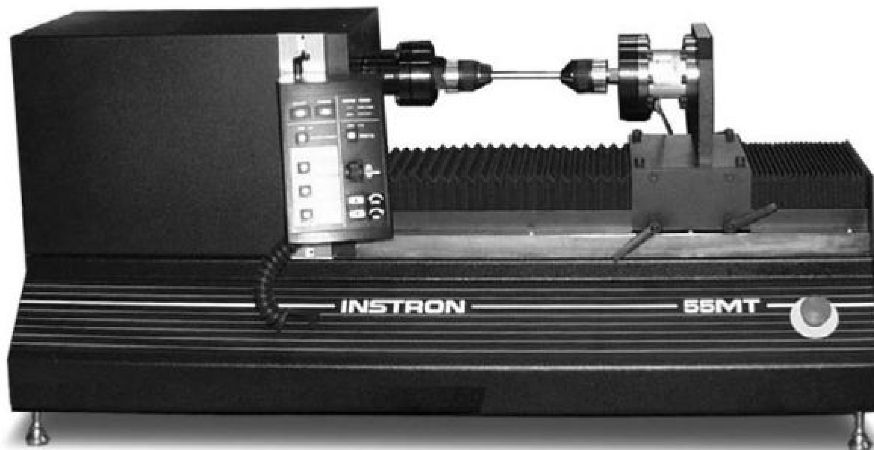


FIGURA 3.16 Aparato de pruebas de torsión.

de torsión y la correspondiente deformación de torsión, por debajo del límite de proporcionalidad del material, que será la pendiente de la línea recta entre R (un esfuerzo

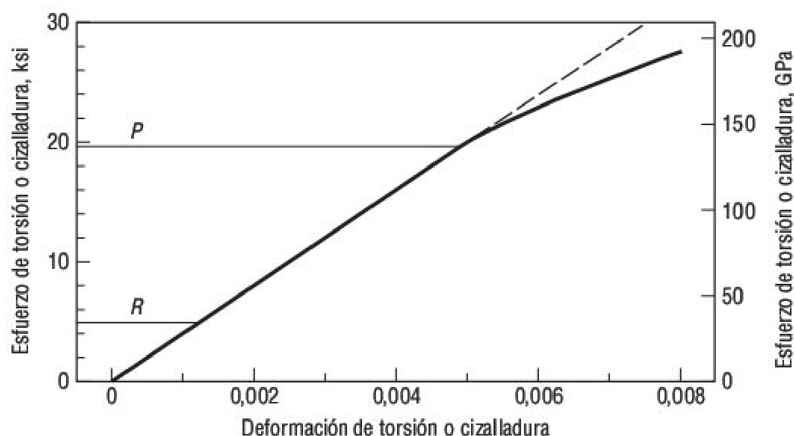


FIGURA 3.17 Diagrama típico de esfuerzo-deformación para torsión del acero (ASTM E143). Copyright ASTM. Reimpreso con su permiso.

pre-par) y P (el límite de proporcionalidad). Para una sección transversal circular, el esfuerzo máximo de torsión ($\tau_{máx}$), la deformación de torsión (γ) y el módulo de rigidez (G) se determinan mediante las ecuaciones:

$$\tau_{máx} = \frac{Tr}{J} \tag{3.1}$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{L} \tag{3.2}$$

$$G = \frac{\tau_{máx}}{\gamma} = \frac{TL}{J\theta} \tag{3.3}$$

donde

T = par
r = radio
J = momento polar de inercia de la probeta con respecto a su centro, $\pi r^4/2$ para una sección transversal circular sólida.
θ = ángulo de torsión en radianes
L = longitud nominal.

El método de prueba está limitado a materiales y esfuerzos para los que la reptación sea despreciable comparada con la deformación producida inmediatamente después de la carga. La probeta de ensayo debe ser correcta, sin imperfecciones en las proximidades de la superficie. Asimismo, debe ser recta y tener un diámetro uniforme para una longitud igual a la longitud nominal más dos a cuatro diámetros. La longitud nominal de prueba debe ser al menos igual a cuatro diámetros. Durante la prueba, el par se lee en un dispositivo de medida conectado a la máquina de pruebas, mientras que el ángulo de

rotación puede medirse utilizando un torsiómetro fijado a la probeta por los dos extremos de la longitud de prueba. Para estimar la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación de torsión de la Figura 3.17 (ASTM E143) puede emplearse un procedimiento de ajuste de curvas.

Problema de ejemplo 3.4

Una varilla de una longitud igual a 1 m y un radio de 20 mm está hecha de acero de alta resistencia. La varilla se somete a un par *T*, que produce un esfuerzo de torsión por debajo del límite de proporcionalidad. Si la sección transversal en uno de los extremos se gira 45 grados respecto del otro extremo y el módulo de rigidez *G* del material es igual a 90 GPa, ¿cuál será el par aplicado?

Solución

$$J = \pi r^4 / 2 = \pi(0{,}02)^4 / 2 = 0{,}2513 \times 10^{-6}\,\text{m}^4$$

$$\theta = 45(\pi / 180) = \pi / 4$$

$$T = GJ\theta / L = (90 \times 10^9) \times (0{,}2513 \times 10^{-6}) \times (\pi / 4) / 1$$

$$= 17{,}8 \times 10^3 \text{ N.m} = 17{,}8 \text{ kN.m}$$

■

3.8.3 Prueba de impacto con péndulo de Charpy

La prueba de impacto con péndulo de Charpy (ASTM E23) se utiliza para medir la tenacidad del material o la energía requerida para fracturar una probeta con una muesca en V y un único punto de soporte. La prueba se emplea para aceros estructurales de elementos sometidos a tensión.

Las dimensiones de la probeta estándar son 55 × 10 × 10 mm (2,165 × 0,394 × 0,394 pulgadas) con una muesca en V en el centro, como se muestra en la Figura 3.18. Antes de llevar a cabo la prueba, la probeta se pone a la temperatura especificada durante un mínimo de cinco minutos en un baño líquido, o de 30 minutos en un medio gaseoso. A continuación, la probeta se inserta en el péndulo de Charpy, que es la máquina para las pruebas de impacto (Figura 3.19), utilizando unas pinzas agarradoras de centrado. El brazo rotatorio de la máquina tiene un cabezal que impacta con la probeta en el lado opuesto a la muesca en V. El cabezal de impacto se libera de su posición inicial, golpeando y fracturando la probeta. Al fracturar la probeta de ensayo, parte de la energía cinética del cabezal de impacto es absorbida, reduciendo así la altura final que el cabezal de impacto puede alcanzar. Midiendo la altura que dicho cabezal consigue después de impactar sobre la probeta, podemos calcular la energía requerida para fracturarlo. Esta energía se mide en m · N (pie · libra) y se muestra en un medidor conectado a la máquina.

La expansión lateral de la probeta normalmente se mide después de las pruebas utilizando una galga. La expansión lateral es una medida de la deformación plástica



FIGURA 3.18 Probetas para péndulo de Charpy.



FIGURA 3.19 Máquina de péndulo de Charpy V para pruebas de impacto.

experimentada durante la prueba. Cuanto mayor sea la tenacidad del acero, mayor será la expansión lateral.

La Figura 1.13 del Capítulo 1 muestra la energía típica (tenacidad) necesaria para fracturar probetas de acero estructural a diferentes temperaturas. La figura muestra que la energía requerida es alta a altas temperaturas y baja a bajas temperaturas, lo que significa que el material cambia de dúctil a frágil según disminuye la temperatura.

La superficie de fractura estará compuesta normalmente por un área de cizalladura mate (dúctil) en los bordes y un área de clivaje brillante (frágil) en el centro, como muestra la Figura 3.20. A medida que disminuye la tenacidad del acero, por ejemplo a causa de la disminución de la temperatura, el área de cizalladura se reduce y la de clivaje se incrementa.

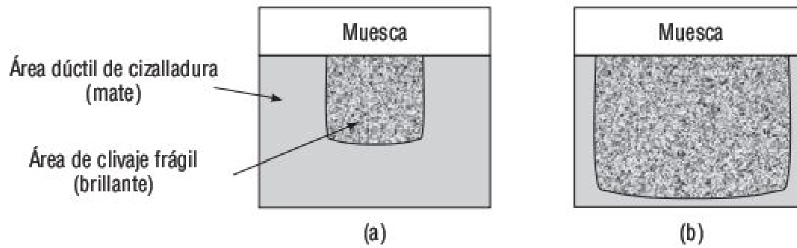


FIGURA 3.20 Superficie de fractura de una probeta para prueba con péndulo de Charpy: (a) a alta temperatura y (b) a baja temperatura.

Problema de ejemplo 3.5

Se realiza una prueba de impacto con péndulo de Charpy (CVN) con una probeta de acero, obteniéndose los siguientes resultados:

Temperatura (°F)	Tenacidad (pie libra)
−40	5
30	7
100	28
170	66
240	79
310	80

Dibuje la tenacidad en función de la temperatura y determine la zona de temperatura correspondiente a la transición del comportamiento dúctil al frágil.

Solución

El diagrama de la tenacidad en función de la temperatura se muestra en la Figura PE3.5. A partir de la figura, se puede ver que la temperatura de la zona de transición entre el comportamiento dúctil y el frágil está entre 30 y 240°F.

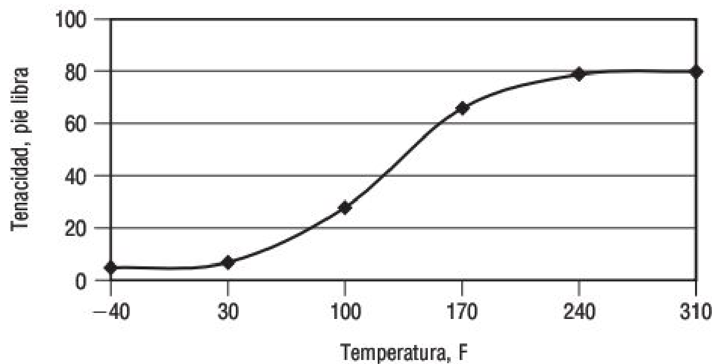


FIGURA PE3.5

3.8.4 Prueba de flexión

En muchas aplicaciones de ingeniería, el acero se dobla para que adquiera una forma determinada, especialmente en el caso de las armaduras de acero. La ductilidad para permitir esa flexión se comprueba realizando una prueba de flexión semiguiada (ASTM E290). La prueba evalúa la capacidad del acero, o de una soldadura, de no presentar fisuras durante la flexión. Esta prueba se efectúa flexionando la probeta un ángulo determinado y con un radio de curvatura interior especificado. Cuando no se produce una fractura completa, el criterio de fallo es el número y tamaño de las fisuras que aparecen en la superficie de tensionado de la probeta después de la flexión.

La prueba de flexión se realiza aplicando una fuerza transversal a la probeta en la parte que está siendo flexionada, normalmente en su centro. Pueden emplearse tres disposiciones distintas, como se ilustra en la Figura 3.21. En la primera de ellas, la probeta está fija por un extremo y se flexiona alrededor de un pasador o mandril de reacción, aplicando una fuerza cerca del extremo libre, como se muestra en la Figura 3.21(a). En la segunda disposición, la probeta se fija por un extremo y se utiliza un dispositivo rotatorio para doblarla alrededor del mandril, como se muestra en la Figura 3.21(b). En la tercera disposición, se aplica una fuerza a la parte central de la probeta, que está soportada por dos puntos de fijación en ambos extremos, como se ilustra en la Figura 3.21(c).

3.8.5 Prueba de dureza

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la aparición de deformaciones plásticas localizadas, como por ejemplo mellas o rasguños en la superficie del material. Se requiere una cierta dureza para muchas herramientas y piezas de máquinas. Hay disponibles diversas pruebas que permiten evaluar la dureza de los materiales. En esta pruebas, se introduce un indentador (penetrador) en la superficie del material, con una magnitud de carga especificada y una determinada velocidad de aplicación. La profundidad o el tamaño de la indentación se mide y se relaciona con un número que indica el índice de dureza. Los materiales duros presentarán indentaciones más pequeñas, lo que corresponde con índices de dureza altos. Las medidas de dureza dependen de las condiciones de prueba y, por tanto, son relativas. Hay disponibles correlaciones y tablas para establecer correspondencias entre las medidas de dureza de obtenidas de distintas pruebas, así como para aproximar la resistencia a la tracción del material (ASTM A370).

Uno de los métodos comúnmente utilizados para medir la dureza del acero y de otros metales es la prueba de dureza de Rockwell (ASTM E18). En esta prueba, se determina la profundidad de penetración de un cono de diamante, o de una bola de acero, dentro de la probeta, en condiciones fijas (Figura 3.22). Primero se aplica una carga de 10 kg, seguida de una carga adicional. El número de Rockwell, que es proporcional a la diferencia de penetración entre las cargas preliminar y total, se lee en un dial, una pantalla digital, un puntero u otro dispositivo de la máquina. Habitualmente, se utilizan dos escalas: B y C. La escala B utiliza un indentador de bola de acero de 1,588 mm (1/16

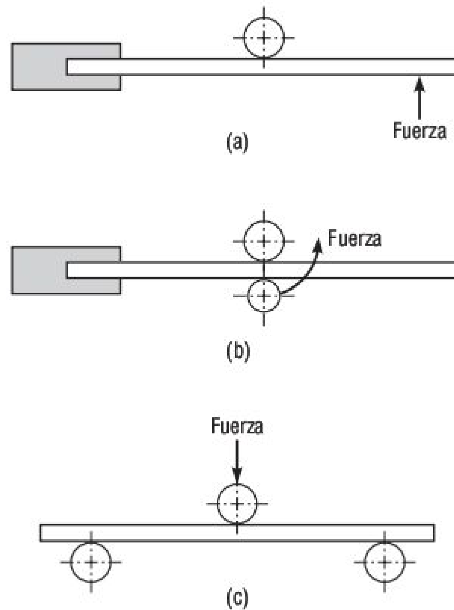


FIGURA 3.21 Esquemáticos de aparejos para pruebas de flexión semiguiadas (ASTM E290). Copyright de ASTM. Reimpreso con su permiso.



FIGURA 3.22 Máquina para realizar la prueba de dureza de Rockwell.

pulgada) y una carga total de 100 kg, mientras que la escala C emplea un indentador esferocónico de diamante con un ángulo de 120° y una carga total de 150 kg.

Para probar acero muy delgado o capas superficiales muy delgadas, se utiliza la *prueba de dureza superficial de Rockwell.* El procedimiento es el mismo que en la prue-

ba de dureza de Rockwell, salvo porque se usan sendas cargas preliminar y total más pequeñas. El número de dureza de Rockwell se indica mediante un número seguido del símbolo HR y de otro símbolo que representa el indentador y las fuerzas utilizadas. Por ejemplo, 68 HRC indica un número de dureza de Rockwell igual a 68 en la escala C de Rockwell.

Las pruebas de dureza son simples, baratas, no destructivas y no requieren probetas especiales. Además, a partir de los números de dureza pueden determinarse otras propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción. Por tanto, las pruebas de dureza son muy comunes y suelen llevarse a cabo más frecuentemente que otras pruebas mecánicas.

3.8.6 Pruebas ultrasónicas

Las pruebas ultrasónicas son un método no destructivo de detección de fallos en los materiales. Resultan particularmente útiles para la evaluación de soldaduras. Durante la prueba, se dirige una onda sonora hacia la unión soldada y esa onda se refleja en las discontinuidades, como se ilustra en la Figura 3.23. Un sensor captura la energía de la onda reflejada y los resultados se muestran en un osciloscopio. Este método es altamente sensible para la detección de defectos planares, como pueda ser una fusión incompleta de la soldadura, una delaminación o la existencia de fisuras.

3.9 Soldadura

Muchas estructuras de ingeniería civil, como cerchas, estructuras y puentes de acero, requieren utilizar la soldadura en las tareas de construcción y reparación. La soldadura es una técnica que permite unir dos piezas de metal aplicando calor para hacer que se unan por fusión. Puede utilizarse un material de aporte para facilitar el proceso. Las propiedades químicas del material de aporte deben seleccionarse cuidadosamente, para que sea compatible con los materiales que van a ser soldados. Hay disponibles diversos métodos de soldadura, pero los tipos más comunes son la soldadura con arco y la soldadura a gas u oxiacetilénica. Otros tipos de soldadura son la soldadura con arco con núcleo fundente, la soldadura con arco con fundente autoprotegido y la soldadura con electroescoria (Frank y Smith, 1990).

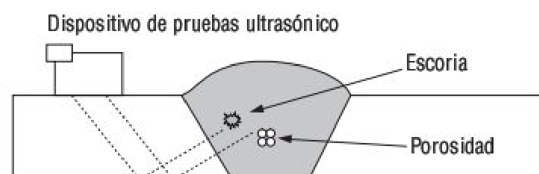


FIGURA 3.23 Prueba ultrasónica de soldaduras.

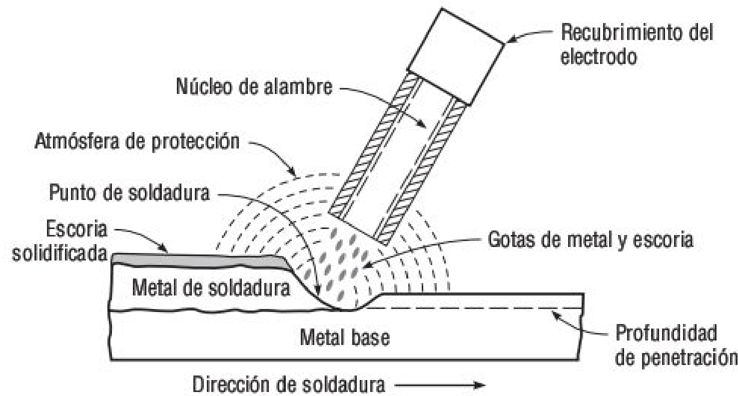


FIGURA 3.24 Diagrama esquemático de soldadura con arco.

La *soldadura con arco* utiliza un arco eléctrico entre el electrodo y el metal base conectado a masa, para hacer que tanto el metal base como el electrodo alcancen sus puntos de fusión. El metal de soldadura depositado resultante es una estructura fundida con una composición que depende de la composición química del metal base, del electrodo y del fundente. La *soldadura con arco protegido* es el tipo más común de soldadura con arco. Está limitada a soldaduras cortas en la construcción de puentes. Se utiliza para este tipo de soldadura un electrodo consumible, cubierto de fundente. El fundente produce una atmósfera protectora en el arco para impedir la oxidación del metal fundido. El fundente también se emplea para tratar impurezas en la soldadura. El fundente solidificado forma una escoria que cubre la soldadura solidificada, como se muestra en la Figura 3.24. La *soldadura con arco sumergido* es un proceso de soldadura con arco semiautomático o automático. En este proceso, la máquina de soldar va alimentando automáticamente un electrodo de alambre desnudo, al mismo tiempo que se deposita un fundente granular en la unión por delante del electrodo. El arco eléctrico pasa a través del fundente fundido, que protege completamente al material de soldadura, aislándolo de la atmósfera. El fundente concentra el calor del arco eléctrico, lo que hace que se consiga una gran penetración en el metal base.

La *soldadura a gas* es otro tipo de soldadura en la que no se usa ningún fundente. Se empela un gas protector externo, que protege el punto de soldadura y proporciona las características deseadas al arco eléctrico (Figura 3.25). Este proceso de soldadura suele emplearse para soldaduras de pequeño tamaño, debido a la falta de formación de escoria.

Debe tenerse cuidado durante la soldadura para no provocar distorsiones, que son el resultado de un calentamiento no uniforme durante el proceso de soldadura. Cuando el metal de soldadura fundido se enfría sufre una contracción, lo que provoca una deformación del material e introduce tensiones residuales en la estructura. Con frecuencia, estas tensiones residuales provocan fisuras fuera del área de soldadura. La distorsión producida por la soldadura puede controlarse secuenciando adecuadamente las soldaduras y predeformando los componentes antes de proceder al soldado. Por último,

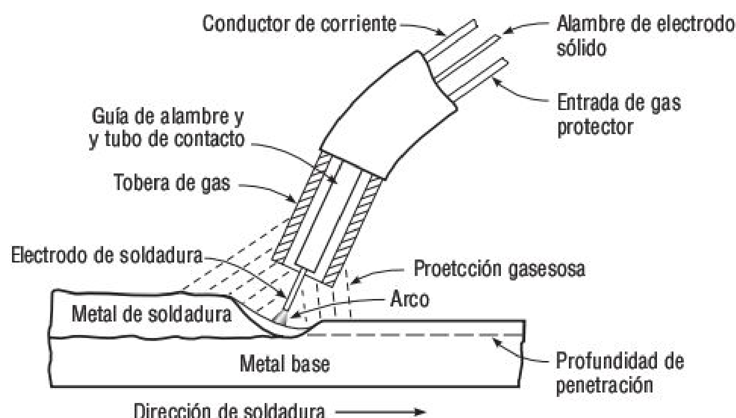


FIGURA 3.25 Esquemático de la soldadura a gas.

el soldador y el inspector deben protegerse los ojos y la piel de las intensas radiaciones ultravioleta que se producen durante la soldadura (Frank y Smith, 1990).

La relativa facilidad con la que el acero puede soldarse guarda una relación con la dureza del mismo. En general, los aceros más duros son más difíciles de soldar. Winterton desarrolló el concepto de utilización de una fórmula equivalente de carbono para estimar el equivalente de carbono de los aceros y un diagrama de zona asociado, con el fin de determinar la necesidad de precalentar el acero para controlar el desarrollo de hidrógeno en el acero soldado. Hay diferentes fórmulas equivalentes de carbono. La que se utiliza para los aceros estructurales es:

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (3.4)$$

La Figura 3.26 muestra las zonas asociadas con las diferentes combinaciones de carbono y de equivalente de carbono. Las zonas se utilizan como guía para determinar el método empleado para fijar los requisitos de precalentamiento (Hassett, 2003):

- Zona I: es improbable que aparezcan fisuras, pero podrían llegar a surgir si hay una gran cantidad de hidrógeno o si el grado de restricción es alto. Utilice el método de control de hidrógeno para determinar el precalentamiento.
- Zona II: hay que emplear el método de control de dureza y la dureza seleccionada para determinar la entrada mínima de energía para soldadura en ángulo de una única pasada sin precalentamiento.
- Zona III: hay que emplear el método de control del hidrógeno.

Los métodos de dureza y de control del hidrógeno son medios utilizados para determinar el nivel de energía utilizado para precalentar el área de soldadura antes de realizar la propia soldadura. El precalentamiento del metal y el uso de electrodos con bajo contenido de hidrógeno son los mejores medios para evitar la fragilización debida al hidrógeno. Este fenómeno tiene lugar cuando el acero se funde durante la solda-

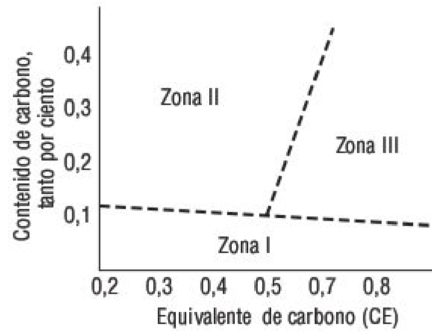


FIGURA 3.26 Clasificación de las zonas de soldadura del acero.

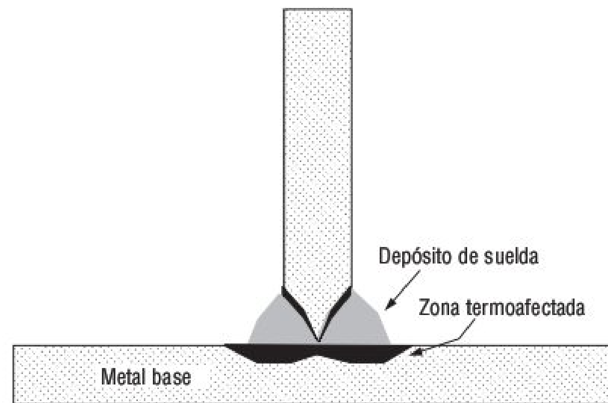


FIGURA 3.27 Zona termoafectada producida durante la soldadura.

dura, lo que puede permitir que se disuelva hidrógeno en el metal fundido y que se difunda hacia el metal base adyacente al punto de soldadura.

Cuando se suelda metal, el material base adyacente al punto de soldadura se calienta a una temperatura que sea suficiente para afectar a su metalurgia. El material afectado de esta manera se denomina zona termoafectada (HAZ, *heat-affected zone*), como se muestra en la Figura 3.27. El material en esta zona constituye un área de alto riesgo de fallo, especialmente si no se han seguido los procedimientos adecuados de precalentamiento y enfriamiento.

3.10 Corrosión del acero

La corrosión se define como la destrucción de un material por reacción electroquímica con el entorno. Por simplicidad, la corrosión del acero puede definirse como la destrucción que puede detectarse mediante la formación de óxido. La corrosión de las estructuras de acero puede crear serios problemas y fallos embarazosos y/o peligrosos. Por

ejemplo, la corrosión de los puentes de acero, si no se controla, puede dar lugar a una limitación de los pesos, a una costosa sustitución de las piezas de acero o a un colapso de la estructura. Otros ejemplos incluyen la corrosión de los conductos, armazones, bastidores y otras estructuras de acero. Se estima que el coste de la corrosión únicamente en Estados Unidos es de 8.000 millones de dólares cada año (Frank y Smith, 1990).

La corrosión es un proceso electromecánico; es decir, es una reacción química en la que existe una transferencia de electrones desde un compuesto químico a otro. En el caso del acero, la transferencia se produce entre el hierro y el oxígeno, en un proceso denominado *oxidación reducción*. La corrosión requiere los siguientes cuatro elementos (sin alguno de ellos, la corrosión no puede tener lugar):

1. Un *ánodo*, el electrodo donde se produce la corrosión.
2. Un *cátodo*, el otro electrodo necesario para formar una celda de corrosión.
3. Un *conductor*, una ruta metálica a través de la que puedan fluir los electrones.
4. Un *electrolito*, un líquido que permita el flujo de electrones.

El acero, siendo un material heterogéneo, contiene ánodos y cátodos. Asimismo, el acero es un conductor eléctrico. Por tanto, contiene tres de los cuatro elementos necesarios para la aparición de la corrosión, y la humedad es habitualmente el cuarto elemento (electrolito).

Las reacciones electroquímicas que se producen en la práctica cuando se corroe el acero son muy complejas. Sin embargo, las reacciones básicas para el acero expuesto a la atmósfera en un entorno químicamente neutral son la disolución del metal en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo.

Los contaminantes depositados en la superficie del acero afectan a las reacciones de corrosión y a la velocidad de corrosión. La sal, ya sea procedente de un anticongelante o debida a la presencia de una atmósfera marina, es un contaminante común que acelera la corrosión de los puentes de acero y el acero de las armaduras de hormigón.

El entorno desempeña un papel importante a la hora de determinar las velocidades de corrosión. Puesto que es necesario un electrolito en la reacción de corrosión, la cantidad de tiempo que el acero permanezca humedecido afectará a la velocidad de corrosión. Asimismo, los contaminantes presentes en el aire, como los óxidos o el azufre, aceleran la corrosión. Por tanto, las áreas con lluvia ácida, con centrales eléctricas de carbón y otras plantas de fabricación química pueden acelerar la corrosión.

3.10.1 Métodos de resistencia a la corrosión

Puesto que el acero contiene tres de los cuatro elementos necesarios para la aparición de corrosión, pueden utilizarse recubrimientos protectores para aislar al acero de la humedad, que es el cuarto elemento. Hay tres mecanismos mediante los que un recubrimiento puede proteger frente a la corrosión (Hare, 1987):

1. Los *recubrimientos de barrera* funcionan exclusivamente aislando el acero de la humedad. Estos recubrimientos tienen una baja permeabilidad al agua y al oxígeno.

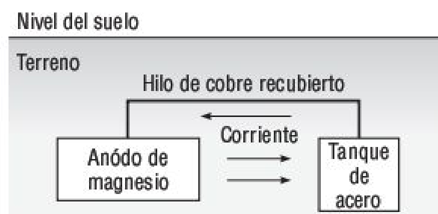


FIGURA 3.28 Protección catódica de un conducto subterráneo mediante un ánodo sacrificial de magnesio.

2. Los *tapaporos de inhabilitación* contienen pigmentos de pasivación. Son pigmentos de baja solubilidad que migran hacia la superficie del acero cuando la humedad pasa a través de la capa protectora, con el fin de pasivar la superficie del metal.
3. Los *tapaporos sacrificiales (protección catódica)* contienen pigmentos como zinc elemental. Puesto que el zinc está situado por encima del hierro en la serie galvánica, cuando se dan condiciones para la corrosión, es el zinc el que proporciona electrones al acero, se convierte en ánodo y se corroe para proteger el acero. Debe existir un contacto estrecho entre el acero y el tapaporos sacrificial para que éste proporcione una protección efectiva contra la corrosión.

La protección catódica puede adoptar otras formas además de la de recubrimiento. Por ejemplo, las estructuras de acero tales como los calentadores de agua, tanques y conductos subterráneos y equipos marinos pueden conectarse eléctricamente a otro metal que sea más reactivo en ese entorno concreto, como por ejemplo el magnesio o el zinc. Dicho metal reactivo (ánodo sacrificial) experimenta la oxidación y proporciona enlaces al acero, protegiéndole de la corrosión. La Figura 3.28 ilustra un tanque de acero subterráneo que está conectado eléctricamente a un ánodo sacrificial de magnesio (Fontana y Green, 1978).

RESUMEN

La historia de la ingeniería civil está estrechamente ligada a la del acero, y esto continuará siendo así, por lo que sabemos, en el futuro próximo. Con el desarrollo de las instalaciones modernas de producción, está prácticamente asegurada la disponibilidad de una amplia variedad de productos de acero a un precio económico. Los principales atributos positivos como material estructural son su alta resistencia, su ductilidad, la capacidad de soportar cargas de tracción y compresión y la capacidad de unir unos elementos con otros mediante soldadura o una unión mecánica. Las propiedades del acero pueden ajustarse para satisfacer las necesidades de aplicaciones específicas, gracias a las aleaciones y a los tratamientos térmicos. La principal desventaja del acero es su tendencia a la corrosión. Cuando se utiliza acero en las estructuras, el ingeniero debe tener en cuenta los medios para proteger al acero frente a la corrosión a lo largo de la vida útil de la estructura.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

3.1 ¿Cuál es la composición química del acero? ¿Cuál es el efecto del carbono sobre las propiedades mecánicas del acero?

3.2 ¿Por qué el diagrama de fases de hierro–carbono solo llega hasta el 6,7% de carbono?

3.3 Dibuje un diagrama de fases hierro–carbono simple que muestre las fases líquida, líquida–sólida y sólida.

3.4 ¿Cuál es el porcentaje máximo típico de carbono en el acero utilizado en las estructuras?

3.5 Calcule las cantidades y composiciones de las fases y constituyentes de un acero compuesto de hierro y de un 0,10% de carbono justo por encima y por debajo de la isoterma eutectoide.

3.6 Explique brevemente cuatro métodos de tratamiento térmico que permiten mejorar las propiedades del acero. ¿Cuáles son las ventajas de cada uno de los tratamientos?

3.7 Defina el concepto de acero de aleación. Explique por qué se añaden agentes de aleación al acero.

3.8 Cite tres agentes de aleación y sus principales efectos.

3.9 Indique específicamente la forma y el tamaño de la sección de acero estructural W 36 × 182.

3.10 ¿Cuáles son los usos típicos del acero estructural?

3.11 ¿Por qué se utiliza una armadura de acero en el hormigón? Explique las propiedades típicas del acero para armaduras.

3.12 ¿Qué es el acero de alta calidad? Indique dos productos HPS que se estén utilizando actualmente en aplicaciones estructurales y especifique sus propiedades.

3.13 Indique tres pruebas mecánicas utilizadas para medir las propiedades del acero.

3.14 Se realizan las siguientes pruebas de laboratorio en una serie de probetas de acero:

a. Prueba de tensión.

b. Prueba de impacto con péndulo de Charpy.

c. Prueba de flexión.

¿Qué importancia tiene cada una de estas pruebas y para qué se usan?

3.15 Dibuje el comportamiento esfuerzo–deformación del acero e identifique los diferentes niveles de resistencia. ¿Cuál es el efecto de incrementar el contenido de carbono del acero? ¿Cuál es un valor típico de la resistencia de fluencia del acero dulce?

3.16 Dibuje una relación típica esfuerzo–deformación para un acero sujeto a tensión. En la gráfica indique el módulo de elasticidad, la resistencia de fluencia, el esfuerzo máximo y el esfuerzo de ruptura.

3.17 Se realiza una prueba de tensión con una probeta de acero. La probeta tiene una anchura de 1,5 pulgadas por 0,5 pulgadas de espesor en la región de pruebas. Monitorizando el indicador de carga de la máquina de prueba, se ve que la probeta alcanza el punto de fluencia para una carga de 37,5 kips y el de fractura para 52,5 kips.

a. Determine los esfuerzos de tracción en el punto de fluencia y en el fractura.

b. Estime el incremento de longitud que se producirá para un 60% del esfuerzo de fluencia, utilizando una longitud nominal de medida de dos pulgadas.

3.18 Una barra redondeada de aleación de acero con un diámetro de 0,5 pulgadas y una longitud de 3,2 pulgadas se somete a tensión obteniéndose los resultados mostrados en la tabla siguiente. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación esfuerzo–deformación. A partir de la gráfica, determine el módulo de Young de la aleación de acero y la deformación correspondiente a una carga de 8225 libras.

Carga (libras)	Deformación, 10^{-4} pulgadas
2.000	11,28
4.000	22,54
6.000	33,80
8.000	45,08
10.000	56,36
12.000	67,66

3.19 Al probar una varilla redondeada de una aleación de acero con un diámetro de 15 mm y una longitud nominal de 250 mm, se obtiene la relación esfuerzo–deformación mostrada en la Figura P3.19. Determine

a. El módulo de elasticidad.

b. El límite de proporcionalidad.

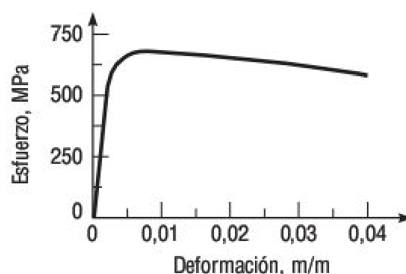


FIGURA P3.19

c. La resistencia de fluencia para un desvío de deformación de 0,002.
d. La resistencia a la tracción.
e. La magnitud de la carga requerida para producir un incremento de longitud de 0,38 mm.
f. La deformación final si la probeta se descarga después de haberla deformado según lo especificado en el apartado (e).
g. Al diseñar una estructura típica hecha de este material, ¿consideraría razonable que la tensión aplicada en (e)? ¿Por qué?

3.20 Durante la prueba de tensión de una varilla de acero en la región elástica, se han medido los siguientes datos:

Carga aplicada = 102 kN
Diámetro original = 25 mm
Diámetro actual = 24,99325 mm
Longitud original = 100 mm
Longitud actual = 100,1 mm

Calcule el módulo de Young y la relación de Poisson.

3.21 Una varilla de acero redondeada de calidad 36 con un diámetro de 0,5 pulgadas y una longitud nominal de dos pulgadas se somete a tensión hasta la ruptura siguiendo el procedimiento de prueba ASTM E-8. Los datos de carga y deformación se proporcionan en la siguiente tabla:

Carga (kips)	Desplazamiento (pulg.)	Carga (kips)	Desplazamiento (pulg.)
0	0	8,56	0,08301
2,75	0,00096	8,79	0,09557
4,07	0,00141	8,98	0,10878
7,12	0,00242	9,15	0,12207
7,14	0,01691	9,25	0,13372
7,34	0,04196	9,35	0,14741
7,53	0,04599	9,44	0,18199
7,91	0,05847	7,87	0,29814
8,28	0,07117		

Utilizando un programa de hoja de cálculo, determine:
a. Un diagrama esfuerzo–deformación. Etiquete los ejes e indique las unidades.
b. Un diagrama de la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación. Determine el módulo de elasticidad utilizando una recta de ajuste.
c. Límite de proporcionalidad.
d. Esfuerzo de fluencia.

e. Resistencia máxima.
f. Cuando la carga aplicada era de 4,07 kips, se midió el diámetro y resultó ser de 0,499905 pulgadas. Determine la relación de Poisson.
g. Una vez rota la varilla, se efectuaron las correspondientes medidas y el diámetro del cuello resultó ser igual a 0,416012 pulgadas. ¿Cuál es el valor real de esfuerzo en el punto de fractura? ¿Es el esfuerzo real en el punto de fractura mayor o menor que el esfuerzo de cálculo en ese punto? ¿Por qué?
h. ¿Cómo esperaría que fuera la deformación real en el punto de fractura: mayor o menor que la deformación de cálculo en ese mismo punto? ¿Por qué?

3.22 Una barra de aleación de acero de alta resistencia a la fluencia con una sección transversal rectangular, con una anchura de 37,5 mm, un espesor de 6,25 mm y una longitud nominal de 203 mm se somete a una prueba de tensión hasta la ruptura siguiendo el método ASTM E-8. Los datos de carga y deformación obtenidos son los mostrados en la Tabla P3.22.

TABLA P3.22

Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)
0	0	159,4	8,560
18,5	0,102	161,2	9,856
84,3	0,379	162,8	11,217
147,4	0,623	164,2	12,588
147,6	1,744	165,0	13,789
149,2	4,327	165,8	15,201
150,8	4,742	166,6	18,767
153,9	6,030	153,6	30,746
157,0	7,339		

Utilizando un programa de hoja de cálculo, determine:
a. Un diagrama esfuerzo–deformación. Etiquete los ejes e indique las unidades.
b. Un diagrama de la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación. Determine el módulo de elasticidad utilizando una recta de ajuste.
c. Límite de proporcionalidad.
d. Esfuerzo de fluencia.
e. Resistencia máxima.
f. Si la probeta se carga únicamente con 155 kN y luego se descarga, ¿cuál será la deformación permanente?
g. Al diseñar una estructura típica con este material, ¿consideraría que la tensión aplicada en (f) es segura? ¿Por qué?

3.23 Una barra de armadura de acero ASTM A615 con una calidad 60 y número 10, con una longitud nominal de ocho pulgadas se somete a una prueba de tensión

hasta fractura siguiendo el método ASTM E-8. Los datos de carga y de deformación obtenidos son los mostrados en la Tabla P3.23.

Tabla P3.23

Carga (kips)	Desplazamiento (pulg.)	Carga (kips)	Desplazamiento (pulg.)
0	0	106,27	0,3320
13,97	0,0036	109,46	0,3823
42,46	0,0094	111,55	0,4351
74,11	0,0163	113,64	0,4883
86,15	0,0676	115,23	0,5392
95,72	0,1592	117,44	0,6032
100,51	0,2339	119,65	0,7279
103,94	0,2847	118,18	0,8832

Utilizando un programa de hoja de cálculo, calcule:

a. Un diagrama esfuerzo–deformación. Etiquete los ejes e indique las unidades.
b. Un diagrama de la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación. Determine el módulo de elasticidad utilizando una recta de ajuste.
c. Límite de proporcionalidad.
d. Esfuerzo de fluencia.
e. Resistencia máxima.
f. Si la barra de armadura se carga únicamente con 88.000 libras y luego se descarga, ¿cuál será la variación permanente de longitud?

3.24 Un conducto de acero con una longitud de un metro, un diámetro exterior de 0,2 metros y un espesor de pared de 10 mm, se somete a una compresión axial de 200 kN. Suponiendo que el módulo de elasticidad es 200 GPa y que la relación de Poisson es de 0,3, calcule:

a. El acortamiento del conducto.
b. El incremento del diámetro exterior.
c. El incremento del espesor de la pared.

3.25 Una varilla de perforación con un diámetro de 12 mm está hecha de una aleación de acero de alta resistencia, con un módulo de rigidez de 80 GPa. La varilla se somete a un par T. ¿Cuál es la longitud mínima requerida L de la varilla para que la sección transversal en uno de los extremos pueda rotarse 90° con respecto al otro extremo, sin exceder un esfuerzo de torsión máximo permitido de 300 MPa?

3.26 ¿Cuál es el módulo de rigidez del material cuya relación esfuerzo–deformación para torsión se muestra en la Figura 3.17? Resuelva el problema utilizando:

a. Unidades del SI.
b. Unidades americanas.

3.27 Un técnico de ingeniería realiza una prueba de tensión en una probeta de acero dulce A36 hasta la fractura. El diámetro original de la probeta es de 0,5 pulgadas

y la longitud nominal es 2,0 pulgadas. La información obtenida a partir de este experimento consta de una carga de tracción aplicada (P) y de un incremento de longitud (ΔL). Los resultados se muestran en la Tabla P3.27. Utilizando un programa de hoja de cálculo, complete la tabla calculando el esfuerzo de cálculo (σ) y la deformación de cálculo (ε). Determine la tenacidad del material u_t calculando el área comprendida bajo la curva esfuerzo–deformación, es decir,

$$u_t = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \, d\varepsilon$$

donde ε_f es la deformación en la fractura. La integral anterior se puede aproximar numéricamente utilizando una técnica de integración trapezoidal:

$$u_t = \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})$$

Tabla P3.27

Observación nº	P (libras)	ΔL (pulg.)	σ (psi)	ε (pulg./pulg.)	u_i (psi)
0	0	0,0000			No aplicable
1	1000	0,0005			
2	2730	0,0010			
3	4180	0,0015			
4	6360	0,0020			
5	8220	0,0025			
6	9310	0,0030			
7	9310	0,0035			
8	9310	0,0040			
9	9320	0,0045			
10	9330	0,0050			
11	9420	0,0100			
12	9450	0,0150			
13	9460	0,0200			
14	9510	0,0250			
15	9690	0,0300			
16	9560	0,0350			
17	9540	0,0400			
18	9650	0,0450			
19	10.060	0,0500			
20	11.870	0,1000			
21	12.830	0,1500			

22	13.360	0,2000	
23	13.670	0,2500	
24	13.850	0,3000	
25	13.920	0,3500	
26	13.960	0,4000	
27	13.800	0,5000	
28	13.600	0,5500	
29	13.150	0,6000	
30	12.510	0,6500	
31	11.690	0,7000	
			$u_t =$

3.28 Realizamos una prueba de impacto con péndulo de Charpy V (CVN) sobre una probeta de acero y se obtienen los datos indicados en la Tabla P3.28. Dibuje la tenacidad en función de la temperatura y determine la temperatura correspondiente a la zona de transición entre el comportamiento dúctil y el frágil.

Tabla P3.28

Temperatura, °C	Tenacidad, Julios (N.m)
−40	7
0	15
50	54
100	109
150	120
200	122

3.29 Se realiza una prueba de impacto con péndulo de Charpy para un puente de acero ASTM A572 de calidad 50. Los valores promedios de los resultados de la prueba para cuatro temperaturas diferentes fueron los siguientes:

10 pie.libra a −50°F	40 pie.libra a 40°F
15 pie.libra a 0°F	60 pie.libra a 100°F

El puente estará ubicado en una región en la que las especificaciones requieren una tenacidad mínima de fractura de 25 pies.libra a 30°F para los elementos soldados críticos con respecto a la fractura. Si el puente contiene un ala soldada en un elemento crítico con respecto a la fractura, ¿tiene el acero una tenacidad adecuada frente a la fractura, según la prueba con el péndulo de Charpy? Indique los cálculos realizados.

3.30 ¿Cómo pueden detectarse las fallas existentes en el acero y en las soldadura? Explique el concepto de prueba no destructiva utilizado para este propósito.

3.31 Determine la clasificación de las zonas de soldadura de los aceros A36 y A922.

3.32 Defina brevemente la corrosión del acero. ¿Cuáles son los cuatro elementos necesarios para que tenga lugar la corrosión?

3.33 Exponga los principales métodos para proteger el acero frente a la corrosión.

3.11 Referencias

Bouchard, S., and G. Axmann. ASTM A913 Grades 50 and 65: Steels for Seismic Applications. *STESSA Conference Proceedings,* 2000.

Budinski, K. G. *Engineering Materials, Properties and Selection*. Quinta edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

Callister, W. D., Jr. *Materials Science and Engineering—an Introduction.* Sexta edición. Nueva York: John Wiley and Sons, 2003.

Carter, C. J., Are You Properly Specifying Materials? *Modern Steel Construction*, enero, 2004.

Cordon, W. A. *Properties, Evaluation, and Control of Engineering Materials.* Nueva York: McGraw-Hill, 1979.

Federal Highway Administration. A High Performance Steel Scorecard, Focus, http://www.tfhrc.gov/focus/apr02/steel.htm, 2002.

Fontana, M. G. and N. D. Greene. *Corrosion Engineering.* Segunda edición. Nueva York: McGraw-Hill, 1978.

Frank, K. H. and L. M. Smith. *Highway Materials Engineering: Steel, Welding and Coatings*. Publicación Nº FHWA-HI-90-006. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1990.

Hare, C. H. *Protective Coatings for Bridge Steel.* National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice No. 136. Washington, DC: Transportation Research Board, 1987.

Hassett, P.M. *Steel Construction in the New Millennium.* Hassett Engineering, Inc., Castro Valley, CA, 2003.

ISG Plate. *High Performance Steel for Bridges*. Coatsville, PA, 2003.

Key-to-Steel. Designation of Carbon and Low-Alloy Steels, http://www.key-to-steel.com, 2005.

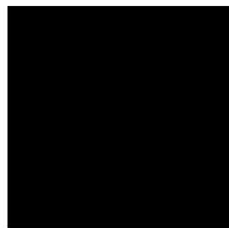
Lane, S., E. Mulley, B. Wright, M. Simon y J.D. Cooper. Focus on high-performance, *Better Roads*, May, 1998.

Miller, D. Mixing Welds and Bolts, Parte 1. *Welding Innovations*. Vol. XVIII, Nº 2, 2001.

Somayaji, S. *Civil Engineering Materials*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

Specialty Steel Industry of North America. *Stainless Steel for Structural Applications, Designer Handbook.* Washington, DC, 1999.

4



ALUMINIO

El aluminio es el metal más abundante de la Tierra, representando aproximadamente el 8% de su corteza. Pero, aunque abundante, el aluminio existe principalmente en forma de óxidos. El proceso de extracción del aluminio a partir de los óxidos requiere mucha energía. De hecho, entre el 2% y el 3% de la electricidad utilizada en Estados Unidos se consume en la producción de aluminio. Este alto consumo de energía hace que el reciclaje de los productos de aluminio resulte económico. De los 24 millones de toneladas de aluminio que se producen anualmente en Estados Unidos, aproximadamente un 75% proviene de una reducción de minerales y el 25% corresponde a materiales reciclados.

Las propiedades del aluminio puro no son adecuadas para aplicaciones estructurales. Algunas aplicaciones industriales requieren aluminio puro, pero, dejando aparte esos casos especiales, prácticamente siempre se añaden elementos de aleación. Estos elementos de aleación junto con el trabajo en frío y los tratamientos térmicos proporcionan características al aluminio que hacen que este producto sea adecuado para un amplio rango de aplicaciones. Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran el uso de aluminio en dos aplicaciones de construcción. Aquí, el término *aluminio* se utiliza para hacer referencia tanto al elemento puro como a las aleaciones.

En términos de la cantidad de metal producido, el aluminio solo se ve superado por el acero. Aproximadamente un 25% del aluminio fabricado se emplea para contenedores y aplicaciones de empaquetado, un 20% para aplicaciones arquitectónicas, como puertas, ventanas y chapas, y un 10% para conductores eléctricos. El resto se utiliza para bienes de tipo industrial, de consumo, en el sector aeronáutico y en el sector de la automoción.

El aluminio representa un 80% del peso estructural de un avión y su uso en la industria del automóvil y de los camiones ligeros se ha incrementado un 300% desde 1971 (Reynolds Metals Company, 1996). Sin embargo, el uso del aluminio en aplicaciones de infraestructuras ha sido bastante limitado. De los aproximadamente 600.000 puentes existentes en Estados Unidos, solo nueve tienen elementos estructurales primarios hechos de aluminio. Dos de las razones de que se haga un uso limitado del aluminio son el coste inicial relativamente alto, si se compara con el del acero, y la falta de información sobre el comportamiento de las estructuras de aluminio.



FIGURA 4.1 Armazón de aluminio utilizado para el soporte estructural de un edificio.



FIGURA 4.2 Fachada de aluminio de un edificio.

El aluminio tiene muchas características favorables y una amplia variedad de aplicaciones. Entre sus ventajas podemos citar (Budinski, 1996):

- Tiene un tercio de la densidad del acero.
- Presenta una buena conductividad térmica y eléctrica.
- Tiene una alta relación resistencia-peso.
- Su superficie se puede endurecer mediante anodización y recubrimientos.
- Tiene aleaciones que son soldables.
- No desarrolla óxido.
- Presenta un alta reflectividad.
- Puede ser moldeado por inyección.
- Se puede mecanizar fácilmente.
- Tiene una buena conformabilidad.
- No es magnético.
- No es tóxico.

La alta relación resistencia-peso del aluminio y su resistencia a la corrosión son los factores principales que hacen del aluminio un material atractivo para la ingeniería de estructuras. Aunque pueden especificarse aleaciones de aluminio con resistencias similares a las de los productos de acero, el módulo de elasticidad del aluminio solo es de aproximadamente un tercio del que presenta el acero. Por tanto, las dimensiones de los elementos estructurales deben incrementarse para compensar el menor módulo de elasticidad del aluminio.

4.1 Producción de aluminio

La producción de aluminio emplea procesos que fueron desarrollados en la década de 1880. Bayer desarrolló el proceso de lixiviación del aluminato de sodio para producir óxido de aluminio puro (Al_2O_3). Hall y Héroult, trabajando independientemente, desarrollaron un proceso electrolítico para reducir el óxido de aluminio a aluminio puro. El proceso básico de producción del aluminio se muestra en la Figura 4.3.

La producción de aluminio se inicia con la extracción del mineral de aluminio, la bauxita. La bauxita de calidad comercial contiene entre un 45% y un 60% de óxido de aluminio. La bauxita se muele, se lava para eliminar los materiales arcillosos y de silicio y se seca en un horno para eliminar gran parte del agua. La bauxita molida se mezcla con ceniza de sosa cáustica y cal viva y se pasa a través de un autoclave, un reductor de presión y un tanque asentamiento, para obtener una solución concentrada de aluminato sódico. Este paso elimina el silicio, el óxido de hierro y otras impurezas de esa solución. En las torres de precipitación, esa solución se alimenta con cristales de óxido de aluminio hidratado. Los cristales atraen a otros cristales de óxido de aluminio y forman grupos que son lo suficientemente pesados como para precipitarse en la solución y asentarse. Los cristales de hidrato de óxido

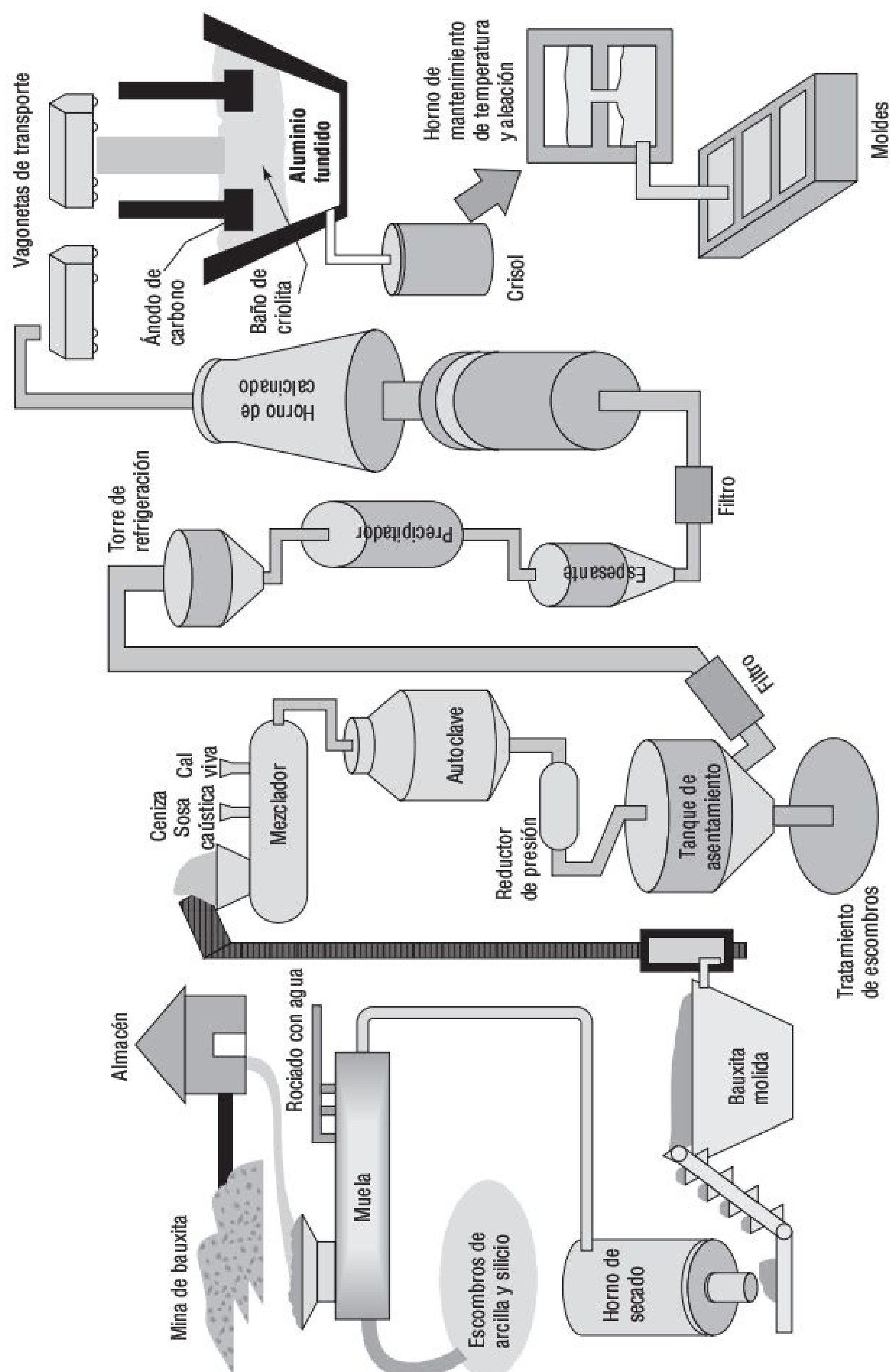


FIGURA 4.3 Proceso de producción del aluminio.

de aluminio se lavan para eliminar las trazas de impurezas restantes y se calcinan en hornos para extraer toda el agua. El óxido de aluminio resultante estará listo para ser reducido mediante el proceso de Hall–Héroult. El óxido de aluminio se funde en un baño de criolita (una sal de sodio–aluminio–fluoruro fundida). Se hace pasar una corriente eléctrica entre ánodos y cátodos de carbono para separar las moléculas de aluminio y de oxígeno. El aluminio fundido se acumula en el cátodo situado en la parte inferior del baño. El aluminio fundido con una pureza superior al 99%, se lleva hasta un crisol y luego se procesa en un horno de mantenimiento de la temperatura. Se hacen pasar gases calientes a través del material fundido para terminar de eliminar las impurezas restantes. A continuación, se añaden los elementos de aleación.

El aluminio fundido, o bien se envía a una fundición para moldearlo y obtener los productos acabados o bien se moldea en lingotes. Los lingotes se forman mediante un proceso de enfriamiento directo que produce láminas de gran tamaño para trenes de laminación, tochos cilíndricos para prensas de extrusión o tochos cuadrados para la producción de alambres, varillas y barras.

Los productos finales se moldean, que es el proceso más antiguo, o se deforman a partir de piezas sólidas de aluminio. Existen tres métodos de moldeo: por inyección, por molde permanente y con fundido en arena. Los procesos básicos de deformación son el forjado, la extrusión por impacto, la estampación, el estirado, y el estirado y planchado. Con el proceso de extrusión se fabrican muchos elementos estructurales. Los elementos moldeados o deformados pueden mecanizarse para obtener la forma final y la textura superficial deseadas, y también pueden tratarse térmicamente para alterar el comportamiento mecánico del aluminio. En la Tabla 4.1 se resumen los métodos de moldeo y conformación.

Para reciclar el aluminio, la chatarra se funde en un horno. El aluminio fundido se purifica y se le añaden los agentes de aleación. Este proceso sólo consume aproximadamente un 5% de la electricidad necesaria para producir aluminio a partir de la bauxita.

Además de estos procesos convencionales, pueden fabricarse piezas de aluminio de muy alta resistencia utilizando métodos metalúrgicos con metal en polvo. Una aleación de aluminio en polvo se compacta en un molde. El material se calienta después a una

TABLA 4.1 Métodos de moldeado y conformación para productos de aluminio (extraída de *Reynolds Infrastructure*, 1996).

Métodos de moldeado	
Fundición en arena	Se utiliza arena y un aglomerante para hacer un molde alrededor de una cierta figura. La figura se extrae y se vierte aluminio fundido en el interior, reproduciendo la forma deseada. Produce una textura rugosa, pudiéndose mecanizar o pulir si se desea. Es económico para bajos volúmenes de producción y para la fabricación de piezas de gran tamaño. También es aplicable cuando hay que conformar un hueco interno dentro del producto.

TABLA 4.1 (Continuación).

Métodos de moldeado	
Molde permanente	El aluminio fundido se vierte en un molde reutilizable de metal. Económico para grandes volúmenes de producción.
Moldeado por inyección	El aluminio fundido se introduce a alta presión en un molde permanente. Adecuado para producción masiva de piezas conformadas de precisión.
Métodos de conformación	
Extrusión	El aluminio calentado a entre 425 y 540°C (800 a 1000°F) se fuerza a pasar a través de una matriz. Es posible producir secciones transversales complejas, incluyendo huecos total o parcialmente cerrados. Pueden fabricarse diversos elementos arquitectónicos y estructurales mediante extrusión, incluyendo tubos, conductos, vigas y componentes decorativos, como marcos de ventanas y puertas.
Laminado	Las laminadoras comprimen y alargan lingotes de aluminio calentados, produciendo placas de más de 6 mm (0,25 pulgadas) de espesor, láminas de 0,15 a 6 mm (0,006 a 0,25 pulgadas) de espesor y hojas de aluminio con un espesor de menos de 0,15 mm (0,006 pulgadas).
Conformación mediante rodillos	Se da forma a una hoja de aluminio haciéndola pasar por una serie de rodillos especiales, normalmente en varias etapas. Se emplea para la producción masiva de productos arquitectónicos, como molduras, canalones, bajantes, techados, chapas, marcos para ventanas y persianas.
Plegado	Conformación de productos a partir de láminas mediante una plegadora. Utiliza herramientas más simples que la conformación mediante rodillos, pero las tasas de producción son menores y el tamaño del producto es limitado.
Operaciones de corte	Producción de formas de contorno mediante troquelado y corte. En el troquelado, se hace pasar una pieza con la forma deseada a través de una matriz en la que encaja. Se usa para la producción masiva de perfiles planos. Los agujeros en una lámina pueden hacerse mediante punción y perforación. Las pilas de láminas pueden recortarse mediante una máquina de tipo guillotina.
Estampación	Conformación de una hoja de aluminio ejerciendo presión entre rodillos o matrices que encajan entre sí, produciendo una forma resaltada en uno de los lados y su hueco correspondiente en el otro.
Estirado	Conformación de una hoja de aluminio estirándola a través del hueco existente entre dos matrices correspondientes en una prensa.
Conformación superplástica	Se calienta una hoja de aluminio y se fuerza a pasar sobre un molde, o a través del mismo, mediante una fuerza neumática. Pueden producirse perfiles complejos y de contornos profundos, pero el proceso es lento.

temperatura que hace que las partículas se fundan, de modo que estas forman un sólido unificado.

4.2 Metalurgia del aluminio

El aluminio presenta una estructura reticular cúbica centrada en las caras (FCC). Es muy maleable, con una elongación típica de más del 40% para una longitud nominal de 50 mm (2 pulgadas). Tiene una resistencia a la tracción limitada del orden de 28 MPa (4000 psi). El módulo de elasticidad del aluminio es de unos 69 GPa (10.000 ksi). El aluminio comercial puro (es decir, con más de un 99% de contenido de aluminio) está limitado a aplicaciones no estructurales, como conductores eléctricos, equipos químicos y trabajos con láminas metálicas.

Aunque la resistencia del aluminio puro es relativamente baja, las aleaciones de aluminio pueden ser hasta 15 veces más resistentes que el aluminio puro, gracias a la adición de pequeñas cantidades de elementos de aleación, al endurecimiento por deformación mediante trabajo en frío y a los tratamientos térmicos. Los elementos de aleación comunes son el cobre, el manganeso, el silicio, el magnesio y el zinc. El trabajo en frío incrementa la resistencia provocando una disrupción de los planos de deslizamiento del material resultantes del proceso de producción.

La Figura 4.4 muestra el diagrama de dos fases para el aluminio y el cobre. Este diagrama es típico de otras aleaciones de dos fases de aluminio. Los elementos de aleación tienen una baja solubilidad en el aluminio, y esa solubilidad se reduce a medida que disminuye la temperatura.

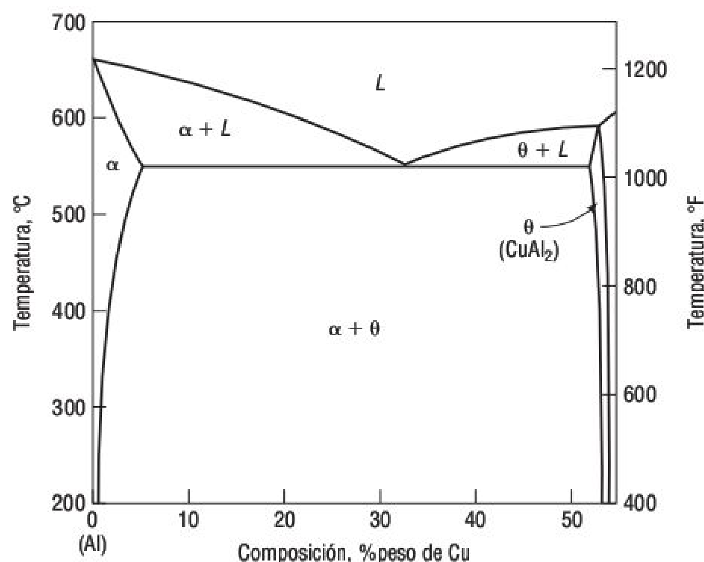


FIGURA 4.4 Diagrama de fases para el aluminio-cobre.

Como hemos descrito anteriormente, las propiedades de los metales con esta característica son muy sensibles a los tratamientos térmicos, que afectan al tamaño de grano del material y a la distribución de los elementos de aleación a lo largo de la matriz de estructuras reticulares. Entre los tratamientos térmicos normalmente utilizados en las aleaciones de aluminio se incluyen el recocido, el endurecimiento, el envejecimiento y la estabilización.

4.2.1 Sistema de designación de las aleaciones

Para clasificar los diversos tipos de aluminio primero se tiene en cuenta el método de fabricación del producto, que puede ser mediante moldeado o mediante forjado. Las aleaciones de aluminio diseñadas para moldeado tienen una composición química que les permite fluir hacia el interior del molde. Las aleaciones de aluminio forjado se utilizan para productos que se fabrican deformando el aluminio hasta obtener su forma final. La Asociación americana del aluminio (Aluminun Association)[1] ha desarrollado un sistema de clasificación de las aleaciones de aluminio, que es el que se muestra en la Tabla 4.2.

El sistema de designación para las aleaciones de aluminio forjado utiliza un código de cuatro dígitos. El primer dígito indica la serie de la aleación. El segundo dígito, si es distinto de 0, indica una modificación en la aleación básica. El tercer y cuarto dígitos identifican la aleación especificada dentro de la serie; estos dígitos se asignan arbitrariamente, excepto para la serie 1xxx, en la que los dos dígitos finales indican el contenido mínimo de aluminio. Para la serie 1xxx, el contenido de aluminio es del 99% más

TABLA 4.2 Sistema de designación para aleaciones de aluminio (Aluminum Association, 1993).

Aleaciones de aluminio forjado		Aleaciones de aluminio moldeado	
Serie de aleación	**Descripción de los principales elementos de la aleación**	**Serie de aleación**	**Descripción de los principales elementos de la aleación**
1xxx	99,00% mínimo de aluminio	1xx.x	99,00% mínimo de aluminio
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganeso	3xx.x	Silicio más cobre y/o magnesio
4xxx	Silicio	4xx.x	Silicio
5xxx	Magnesio	5xx.x	Magnesio
6xxx	Magnesio y silicio	6xx.x	Serie no utilizada
7xxx	Zinc	7xx.x	Zinc
8xxx	Otro elemento	8xx.x	Estaño
9xxx	Serie no utilizada	9xx.x	Otro elemento

[1] Las denominaciones establecidas por la Aluminium Association tienen carácter internacional y son de uso común en España.

los últimos dos dígitos del código, expresados como fracción decimal. Por ejemplo, un 1060 tiene un contenido mínimo de aluminio del 99,60%.

A las aleaciones para moldeado se les asigna un número de tres dígitos seguido de un dígito después del punto decimal, como se muestra en la Tabla 4.2. El primer dígito representa la serie de la aleación. Observe que las series 3, 6, 8 y 9 tienen diferentes significados en el caso de moldeado y en el de forjado. El segundo y tercer dígitos se asignan arbitrariamente para identificar aleaciones específicas. El dígito después del decimal indica si la composición de la aleación es para moldeado final (xxx.0) o para lingotes (xxx.1 y xxx.2).

4.2.2 Tratamientos de revenido

Las propiedades mecánicas del aluminio se modifican enormemente mediante tratamiento térmico y mediante endurecimiento por deformación. Por tanto, la especificación de un aluminio debe incluir la forma en la que se reviene o templa el producto. Los procesos descritos en la Tabla 4.3 definen los tipos de revenido a los que se someten los productos de aluminio.

Las aleaciones de aluminio utilizadas en aplicaciones estructurales se clasifican como termotratables o no termotratables. Las aleaciones no termotratables o "comunes"

TABLA 4.3 Designaciones para el revenido de aleaciones de aluminio.

Símbolo	Significado	Comentarios
F	de fábrica	No se emplea ningún control especial sobre las condiciones térmicas o el endurecimiento por deformación.
O	recocido	Productos forjados: recocido hasta adquirir el temple correspondiente a la mínima resistencia. Productos moldeados: recocido para mejorar la ductilidad y la estabilidad dimensional. La letra "O" puede ir seguida por un dígito distinto de cero, lo que indica una variante con características especiales.
H	endurecido por deformación	Solo para productos forjados. La resistencia se incrementa mediante endurecimiento por deformación, con o sin tratamientos térmicos suplementarios. La letra "H" siempre va seguida por dos o más dígitos numéricos. El primer dígito indica una combinación específica de operaciones básicas. El segundo dígito indica el grado de endurecimiento por deformación. (Los códigos para el segundo dígito son 2: un cuarto de endurecimiento, 4: medio endurecimiento, 8: endurecimiento completo, 9: endurecimiento extra.) Cuando se utiliza el tercer dígito indica una variante del temple especificado por los dos dígitos. Las operaciones básicas se identifican mediante el primer dígito de la forma siguiente:

TABLA 4.3 (Continuación).

Símbolo	Significado	Comentarios
H	endurecido por deformación	H1: únicamente endurecimiento por deformación. Se aplica a productos que se endurecen por deformación para obtener la resistencia deseada, sin tratamiento térmico suplementario. H2: endurecido por deformación y parcialmente recocido. Se aplica a productos que se endurecen por deformación más que el valor final deseado y cuya resistencia se reduce luego hasta el valor deseado mediante recocido parcial. H3: endurecido por deformación y estabilizado. Se aplica a productos que se endurecen por deformación y cuyas propiedades mecánicas se estabilizan mediante un tratamiento térmico a baja temperatura o como resultado del calor introducido durante la fabricación. Normalmente, la estabilización mejora la ductilidad.
W	solución termotratada	Un temple inestable aplicable únicamente a las aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después de efectuado el tratamiento térmico de la solución. Esta designación se especifica solo cuando se indica el periodo de envejecimiento natural; por ejemplo, W 1/2 hr.
T	termotratado para producir templados estables distintos de F, O o H	Se aplica a los productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementario para producir temples estables. La "T" siempre va seguida de uno o dos dígitos: T1: enfriado a partir de un proceso de conformación a temperatura elevada y envejecido de forma natural hasta una condición sustancialmente estable. Productos que no son trabajados en frío después del enfriamiento a partir del proceso de conformación a temperatura elevada, o en los que el efecto del aplanamiento mediante trabajo en frío pueden no reconocerse en los límites que afectan a las propiedades mecánicas. T2: enfriado a partir de un proceso de conformación a temperatura elevada, trabajado en frío y envejecido de forma natural hasta alcanzar una condición sustancialmente estable. Productos trabajados en frío para mejorar la resistencia después de enfriarlos a partir de un proceso de conformación a temperatura elevada, o en los que el efecto del trabajo en frío para aplanar los productos se reconoce en la especificación de los límites de las propiedades mecánicas. T3: solución termotratada, trabajada en frío y envejecida de forma natural hasta alcanzar una condición sustancialmente estable. Productos trabajados en frío para mejorar la resistencia después del termotratamiento, o en los que el efecto del trabajo en frío para el aplanamiento del producto se reconoce al especificar los límites de las propiedades mecánicas.

Continúa

TABLA 4.3 (Continuación).

Símbolo	Significado	Comentarios
		T4: solución termotratada y envejecida de forma natural hasta alcanzar una condición sustancialmente estable. Productos no trabajados en frío después del termotratamiento de la solución, o en los que el efecto del trabajo en frío para el aplanamiento del produto se reconoce al especificar los límites de las propiedades mecánicas.
		T5: enfriado a partir de un proceso de conformación a temperatura elevada y luego envejecido artificialmente. Productos no trabajados en frío después del enfriamiento a partir del proceso de conformación a temperatura elevada, o en los que el efecto del trabajo en frío para el aplanamiento del producto puede no ser reconocido al especificar los límites de las propiedades mecánicas.
		T6: solución termotratada y luego envejecida artificialmente. Productos no trabajados en frío después del termotratamiento de la solución o en los que el efecto del trabajo en frío para el aplanamiento del producto puede no ser reconocido al especificar los límites de las propiedades mecánicas
		T7: solución termotratada y sobreenvejecida/estabilizada. Productos forjados artificialmente envejecidos después del termotratamiento de la solución, para llevarlos más allá de un punto máxima resistencia, con el fin de proporcionar control sobre alguna característica significativa. Productos moldeados envejecidos de forma artificial después del termotramiento de la solución para proporcionar estabilidad a la resistencia y a las características dimensionales.
		T8: solución termotratada, trabajada en frío y luego envejecida de forma artificial. Productos trabajados en frío para mejorar la resistencia, o en los que el efecto del trabajo en frío para el aplanamiento del producto se reconoce al especificar los límites de las propiedades mecánicas.
		T9: solución termotratada, envejecida de forma artificial y luego trabajada en frío. Productos trabajados en frío para mejorar la resistencia.
		T10: enfriados a partir de un proceso de conformación a temperatura elevada, trabajados en frío y luego envejecidos de forma artificial. Productos trabajados para mejorar la resistencia, o en los que el efecto del trabajo en frío para el aplanamiento del producto se reconoce al especificar los límites de las propiedades mecánicas. Pueden añadirse dígitos adicionales a las designaciones de temple anteriores para indicar variantes significativas.

contienen elementos que permanecen sustancialmente en solución sólida o que forman constituyentes insolubles. Por tanto, el termotratamiento no influye en sus propiedades mecánicas. Las propiedades de estas aleaciones dependen de la cantidad de trabajo en frío realizado después de la recocción. Las aleaciones termotratables o "fuertes" contienen elementos, grupos de elementos o constituyentes que tienen una considerable solubilidad sólida a temperaturas elevadas y una solubilidad limitada a temperaturas más bajas. La resistencia de estas aleaciones se incrementa principalmente mediante termotratamiento.

4.3 Pruebas y propiedades del aluminio

En las Tablas 4.4 y 4.5 se proporcionan las propiedades típicas para aleaciones de aluminio forjado no termotratables y termotratables, respectivamente. Las propiedades típicas para las aleaciones de aluminio moldeado que pueden utilizarse en aplicaciones estructurales se detallan en la Tabla 4.6. Estos valores son solo una indicación de las propiedades de las aleaciones de aluminio moldeado. Las propiedades de material de los elementos moldeados pueden variar a lo largo del cuerpo del elemento, debido a las tasas diferenciales de enfriamiento.

Las pruebas realizadas con el aluminio son similares a las que hemos descrito para el acero. Normalmente, entre ellas se incluyen las pruebas de esfuerzo–deformación para tracción, que permiten determinar el módulo de elasticidad, la resistencia de fluencia, la resistencia máxima y el porcentaje de elongación. A diferencia del acero, las aleaciones de aluminio no muestran un punto de fluencia superior e inferior. En lugar de ello, la curva de esfuerzo–deformación es lineal hasta el límite proporcionalidad y luego pasa a ser una curva suave, hasta alcanzar la resistencia máxima. La resistencia de fluencia se define basándose en el método de 0,20% de desvío de deformación, como se muestra en la Figura 4.5. Como se ha indicado anteriormente, el módulo de elasticidad de las aleaciones de aluminio está en torno a 69 GPa (10.000 ksi) y no es sensible a los tipos de aleación ni a los tratamientos de revenido.

Problema de ejemplo 4.1

Una varilla de aleación de aluminio con un diámetro de 10 mm se somete a una carga de tracción de 5 kN. Después de aplicar la carga, se mide el diámetro y se determina que es igual a 9,997 mm. Si la resistencia de fluencia es de 139 MPa, calcule la relación de Poisson del material.

Solución

$$\sigma = \frac{5000}{\pi d^2 / 4} = 63{,}7 \times 10^6 \text{ Pa} = 63{,}7 \text{ MPa}$$

TABLA 4.4 Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio para forjado no termotratables.

Aleación		Tensión						Dureza[2]	Rigidez máxima		Límite de resistencia a la fatiga[3]		Composición química nominal
		Máxima		Fluencia		Elongación[1] (espesor)							
		ksi	MPa	ksi	MPa	1/16	1/2		ksi	MPa	ksi	MPa	
1060	O	10	69	4	28	43		19	7	48	3	21	99,6 Al
	H-12	12	83	11	76	16		23	8	55	4	28	
	H-14	14	97	13	90	12		26	9	62	5	34	
	H-16	16	110	15	103	5		30	10	69	6.5	45	
	H-18	19	131	18	124	6		35	11	76	6.5	45	
1100	O	13	90	5	34	35	45	23	9	62	5	34	99 Al
	H-12	16	110	15	103	12	25	28	10	69	6	41	
	H-14	18	124	17	117	9	50	32	11	76	7	48	
	H-16	21	145	20	138	6	17	38	12	83	9	62	
	H-18	24	165	22	152	5	15	44	13	90	9	62	
3003	O	16	110	6	41	30	40	28	11	76	7	48	1,2 Mn
	H-12	19	131	18	124	10	20	35	12	83	8	55	
	H-14	22	152	21	145	8	16	40	14	97	9	62	
	H-16	26	179	25	172	5	14	47	15	103	10	69	
	H-18	29	200	27	186	4	10	55	16	110	10	69	

TABLA 4.4 (Continuación)

5005	O	18	124	6	41	25		28	11	76			0,8 Mg
	H-12	20	138	19	131	10			14	97			
	H-14	23	159	22	152	6			14	97			
	H-16	26	179	25	172	5			15	103			
	H-18	29	200	28	193	4			16	110			
	H-32	20	138	17	117	11		36	14	97			
	H-34	23	159	20	138	8		41	14	97			
	H-36	26	179	24	165	6		46	15	103			
	H-38	29	200	27	186	5		51	16	110			
5086	O	38	262	17	117	22	30	60	23	159	21	145	Mg
	H-32	42	290	30	207	12	16	72	25	172	22	152	0,45 Mn
	H-34	47	324	37	255	10	14	82	27	186	23	159	
	H-111	40	276	27	186		17	65	23	159	21	145	
	H-112	39	269	19	131	14		64	23	159	21	145	
	H-116	42	290	30	207		16	72	25	173	22	152	
5456	O	45	310	23	159	20	24	70	27	186	22	152	5,1Mg
	H-111	47	324	33	228		18	75	27	186	24	165	0,7Mn
	H-112	45	310	24	156		22	70	27	186			0,12 Cr
	H-116	51	352	37	255		16	90	30	207	23	159	

[1]Porcentaje de elongación sobre 2 pulgadas.
[2]Número de Brinell, carga 500 kg.
[3]500.000.000 de ciclos de inversión completa de esfuerzo, utilizando una probeta y un tipo de máquina R.R. Moore.

Está claro que el esfuerzo aplicado está bastante por debajo del esfuerzo de fluencia y que, como resultado, la deformación es elástica. Por tanto, asumimos que

$$E = 69 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon_{axial} = \frac{\sigma}{E} = \frac{63{,}7 \times 10^6}{69 \times 10^9} = 0{,}000923 \text{ m/m}$$

$$\Delta d = 9{,}997 - 10{,}000 = 0{,}003 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{lateral} = -\frac{0{,}003}{10{,}000} = -0{,}0003 \text{ m/m}$$

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}} = \frac{0{,}0003}{0{,}000923} = 0{,}33$$

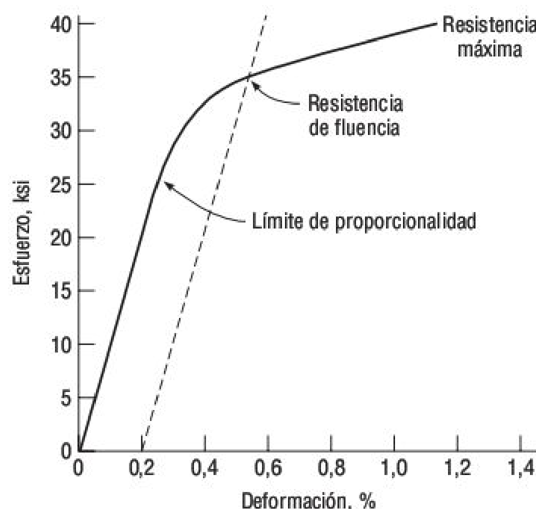


FIGURA 4.5 Diagrama esfuerzo-deformación del aluminio.

El coeficiente de expansión térmica del aluminio es 0,000023/°C (0,000013/°F), aproximadamente dos veces el del acero y el hormigón. Por tanto, las juntas entre el aluminio y el acero o el hormigón deben diseñarse teniendo en cuenta los movimientos diferenciales.

La resistencia del aluminio se ve considerablemente afectada por la temperatura, como se muestra en la Figura 4.6. A temperaturas por encima de 150°C (300°F), las resistencias a la tracción se reducen considerablemente. La temperatura a la que la reducción comienza y el grado de la reducción dependen de la aleación. A temperaturas por debajo de la temperatura ambiente, el aluminio se vuelve más fuerte y tenaz a medida que la temperatura decrece.

TABLA 4.5 Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio para forjado termotratables.

Aleación		Tensión						Dureza[2]	Rigidez máxima		Límite de resistencia a la fatiga[3]		Composición química nominal
		Máxima		Fluencia		Elongación[1] (espesor)							
		ksi	MPa	ksi	MPa	1/16"	1/2"		ksi	MPa	ksi	MPa	
2014	O	27	186	14	97		18	45	18	124	13	90	4,5 Cu, 0,8 Mn
	T4/T451	62	427	42	290		50	105	38	262	20	138	0,8 Si, 0,4 M
	T6/T651	70	483	60	414		13	135	42	290	18	124	
6053	O	16	110	8	55		35	26	11	76	8	55	1,2 Mg,
	T6	37	255	32	221		13	80	23	159	12	90	0,25 CR
6061	O	18	124	8	55	25	30	30	12	83	9	62	1,0 Mg, 0.6 SI
	T4/T451	35	241	21	145	22	25	65	24	165	14	97	0,25 Cu,
	T6/T651	45	310	40	276	12	17	95	30	207	14	97	0,25 Cr
6063	O	13	90	7	48			25	10	69	8	55	0,7 Mg
	T1	22	152	13	90	20	33	42	14	97	9	62	0,4 Si
	T4	25	172	13	90	22			16	110			
	T5	27	186	21	145	12	22	60	17	117	10	69	
	T6	35	241	31	214	12	18	73	22	152	10	69	
	T83	37	255	35	241	9		82	22	152			
	T831	30	207	27	186	10		70	18	124			
	T832	42	290	39	269	12		95	27	186			
7178	O	33	228	15	103	15	16	60	22	152			6,8 Zn, 2,0 Cu
	T6/T651	88	607	78	538	10	11	160	52	359	22	152	2,7 Mg, 0,3 Mn
	T76/ T765	83	572	73	503		11						

[1]Porcentaje de elongación sobre 2 pulgadas.

[2]Número de Brinell, carga 500 kg.

[3]500.000.000 de ciclos de inversión completa de esfuerzo, utilizando una probeta y un tipo de máquina R.R. Moore.

TABLA 4.6 Propiedades típicas de aleaciones seleccionadas de aluminio para moldeado.

Designación de aleación para moldeado	Tensión					Dureza[2]	Rigidez máxima		Límite de resistencia a la fatiga	
	Máxima		Fluencia		Elongación[1]					
	ksi	MPa	ksi	MPa			ksi	MPa	ksi	MPa
356.0-T6[4]	40	276	27	186	5	90	32	221	13	90
356.0-T7[4]	33	228	24	165	5	70	25	172	11	76
A356.0-T61[4]	41	283	30	207	10	80				
A357.0-T6[4]	50	345	40	276	10	85	43	296	16	110
A444.0-T4[4]	23	159	10	69	21	45				
356.0-T6[5]	33	228	24	165	3,5	70	26	179	8,5	59
356.0-T7[5]	34	234	30	207	2,0	75	24	165	9,0	62
Almag 35 535.0[5]	40	276	21	145	13	70	28	193	10	69

[1]Porcentaje de elongación sobre 2 pulgadas.
[2]Número de Brinell, carga 500 kg.
[3]500.000.000 de ciclos de inversión completa de esfuerzo, utilizando una probeta y un tipo de máquina R.R. Moore.
[4]Molde permanente.
[5]Fundido en arena.

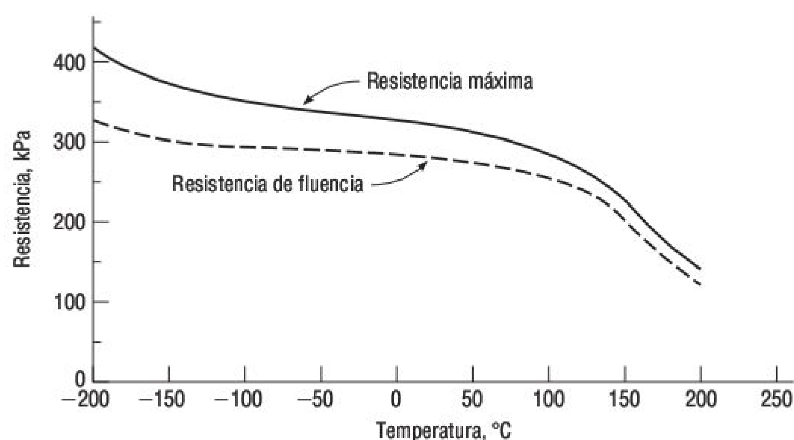


FIGURA 4.6 Resistencia a la tracción del aluminio a diferentes temperaturas. (Cortesía de la Aluminum Association, 1987.)

4.4 Soldadura y fijación

Las piezas de aluminio pueden unirse mediante soldadura o empleando algún elemento de fijación. La soldadura requiere que se rompa el duro recubrimiento de óxido del aluminio y que se impida que este vuelva a formarse al soldar, por lo que la soldadura con arco suele llevarse a cabo en presencia de un gas inerte que protege a la soldadura del oxígeno atmosférico. Los dos procesos comunes mediante los que se suelda el aluminio son la soldadura con arco de electrodo metálico en atmósfera inerte, GMAW, y la soldadura con arco de tungsteno en atmósfera inerte, GTAW. En el proceso GMAW, el alambre de metal de aportación sirve también como electrodo. GTAW utiliza un electrodo de tungsteno y un alambre de metal de aportación separado. La temperatura puede modificar el temple del aluminio en el área soldada. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de 6061-T6 es 290 MPa (42 ksi), pero la resistencia a la tracción de una soldadura con esta aleación es solo de unos 165 MPa (24 ksi). Para propósitos de diseño, se asume que la soldadura afecta a un área de 25 mm (1 pulgada) a cada lado de la soldadura.

Además de la soldadura, pueden utilizarse pernos o remaches para unir las piezas de aluminio. Los pernos pueden ser de aluminio o de acero. Si se utilizan pernos de acero, tienen que estar galvanizados, aluminizados, recubiertos de cadmio o ser de acero inoxidable, para impedir la aparición de corrosión galvánica. Los remaches se hacen de aluminio y se colocan en frío. Las uniones, tanto empernadas como remachadas, se diseñan basándose en la resistencia a la torsión del elemento de fijación y en la resistencia de apoyo del material que se está uniendo.

4.5 Corrosión

El aluminio desarrolla una fina capa de oxidación inmediatamente después de exponerlo a la atmósfera. Esta fina capa de óxido protege a la superficie de una oxidación posterior. Los elementos de aleación modifican la resistencia a la corrosión del aluminio. A las aleaciones utilizadas para las aeronaves normalmente se les da una protección adicional, pintándolas o "revistiéndolas" con una fina capa de aleación resistente a la corrosión. Generalmente, en las aleaciones de resistencia media empleadas en aplicaciones estructurales no es necesario pintar los elementos.

La corrosión galvánica se produce cuando el aluminio está en contacto con uno de varios posibles metales en presencia de un conductor eléctrico, como por ejemplo el agua. La mejor protección para este problema consiste en romper el camino eléctrico de la celda galvánica pintando la pieza, utilizando un aislante o manteniendo secos esos distintos metales.

R E S U M E N

Aunque el aluminio tiene muchos atributos deseables, su uso como material estructural en ingeniería civil ha sido limitado, principalmente por consideraciones económicas y por una falta de información sobre las características. Las aleaciones de aluminio y los tratamientos térmicos proporcionan productos con un amplio rango de características. Entre la ventajas del aluminio respecto del acero se incluyen su menor peso, su alta relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión.

C U E S T I O N E S Y P R O B L E M A S

4.1 Indique dos factores principales que hacen del aluminio un material atractivo para la ingeniería de estructuras.

4.2 Compare la resistencia y el módulo de elasticidad de las aleaciones de aluminio con los del acero.

4.3 Una probeta de aleación de aluminio con un radio de 0,28 pulgadas se somete a una prueba de tensión hasta fractura, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla P4.3.

Tabla P4.3

Esfuerzo, ksi	Deformación, 10^{-3} pulg./pulg.
8	0,6
17	1,5
27	2,4
35	3,2
43	4,0
50	4,6
58	5,2
62	5,8
64	6,2
65	6,5
67	7,3
68	8,1
70	9,7

a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación esfuerzo–deformación.
b. Calcule el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio.
c. Determine el límite de proporcionalidad.
d. ¿Cuál será la carga máxima si el esfuerzo en la barra no debe exceder el límite de proporcionalidad?
e. Determine la resistencia de fluencia para una desviación del 0,2%.
f. Determine la resistencia a la tracción.
g. Determine el porcentaje de elongación en el punto de fallo.

4.4 Una barra redondeada de aleación de aluminio con un diámetro de 0,5 pulgadas y una longitud nominal de 2 pulgadas se somete a una prueba de tensión hasta fractura. Los datos de carga y de deformación obtenidos son los mostrados en la Tabla P4.4.

Tabla P4.4

Carga (libras)	ΔL (pulg.)	Carga (libras)	ΔL (pulg.)
0	0,0000	10.853	0,0136
1395	0,0014	11.461	0,0168
2800	0,0028	12.050	0,0220
4195	0,0042	12.599	0,0310
5600	0,0055	12.953	0,0420
7010	0,0070	13.188	0,0528
8282	0,0083	13.345	fractura
9852	0,0103		

Utilizando un programa de hoja de cálculo, determine:
a. Un diagrama de la relación esfuerzo–deformación. Etiquete los ejes e indique las unidades.
b. Un diagrama de la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación. Determine el módulo de elasticidad utilizando una recta de ajuste.
c. Límite de proporcionalidad.
d. Esfuerzo de fluencia para una desviación de deformación de 0,002 pulg./pulg.
e. Módulo de tangente para un esfuerzo de 60 ksi.
f. Módulo de secante para un esfuerzo de 60 ksi.

4.5 Una barra de aleación de aluminio con una sección transversal rectangular que tiene una anchura de 12,5 mm, un espesor de 6,25 mm y una longitud de 50 mm se somete a una tensión hasta fractura, de acuerdo con el método ASTM E-8. Los datos de carga y de deformación obtenidos se muestran en la Tabla P4.5.
Utilizando un programa de hoja de cálculo, obtenga lo siguiente:
a. Un diagrama de la relación esfuerzo–deformación. Etiquete los ejes e indique las unidades.

b. Un diagrama de la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación. Determine el módulo de elasticidad utilizando una recta de ajuste.
c. Límite de proporcionalidad.
d. Esfuerzo de fluencia para una desviación de deformación de 0,002 pulg./pulg.
e. Módulo de tangente para un esfuerzo de 450 MPa.
f. Módulo de secante para un esfuerzo de 450 MPa.

Tabla P4.5

Carga (kN)	ΔL (mm)	Carga (kN)	ΔL (mm)
0	0	33,5	1,486
3,3	0,025	35,3	2,189
14,0	0,115	37,8	3,390
25,0	0,220	39,8	4,829
29,0	0,406	40,8	5,961
30,6	0,705	41,6	7,386
31,7	0,981	41,2	8,047
32,7	1,245		

4.6 Una barra de aleación de aluminio redondeada con un diámetro de 0,25 pulgadas y una longitud nominal de 1 pulgada se somete a una prueba de tensión hasta fractura de acuerdo con el método ASTM E-8. Los datos de carga y de deformación obtenidos son los mostrados en la Tabla P4.6.

Tabla P4.6

Carga (libras)	Desplazamiento (pulgadas)	Carga (libras)	Desplazamiento (pulgadas)
0	0	2957	0,02926
288	0,00050	3119	0,04310
1239	0,00225	3337	0,06674
2207	0,00432	3513	0,09506
2562	0,00799	3604	0,11734
2703	0,01388	3677	0,14539
2800	0,01930	3643	0,15841
2886	0,02451		

Utilizando un programa de hoja de cálculo, obtenga lo siguiente:
a. Un diagrama de la relación esfuerzo–deformación. Etiquete los ejes e indique las unidades.
b. Un diagrama de la parte lineal de la relación esfuerzo–deformación. Determine el módulo de elasticidad utilizando una recta de ajuste.
c. Límite de proporcionalidad.
d. Esfuerzo de fluencia para una desviación de deformación de 0,002 pulg./pulg.

e. Módulo de tangente inicial:
   1. Si la probeta se carga únicamente con 3.200 libras y luego se descarga, ¿cuál será el cambio permanente de longitud?
   2. Cuando la carga aplicada era igual a 1.239 libras, se midió el diámetro y era de 0,249814 pulgadas. Determine la relación de Poisson.

4.7 Una varilla de aleación de aluminio tiene una sección tranversal circular de diámetro igual a 8 mm. La varilla se somete a una carga de tracción de 4 kN. Suponiendo que $E = 69$ GPa.
a. ¿Cuál será la deformación lateral si la relación de Poisson es de 0,33?
b. ¿Cuál será el diámetro después de aplicar la carga?

4.8 Una varilla de aleación de aluminio 3003-H14 con un diámetro de 0,5 pulgadas se somete a una carga de tracción de 2.000 libras. Calcule el diámetro resultante de la varilla. Si la varilla se somete a una carga de compresión de 2.000 libras, ¿cuál será el diámetro de la misma? Suponga que el módulo de elasticidad es igual a 10.000 ksi, la relación de Poisson es 0,33 y la resistencia de fluencia es 21 ksi.

4.9 La relación esfuerzo–deformación de una barra de aleación de aluminio que tiene una longitud de 2 m y un diámetro de 10 mm se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{70.000} = \left[1 + \frac{3}{7}\left(\frac{\sigma}{270}\right)^9\right]$$

donde σ está en MPa. Si la varilla se carga axialmente con una fuerza de tracción de 20 kN y luego se descarga, ¿cuál será la deformación permanente de la barra?

4.10 Se realiza una prueba de tensión en una probeta de aleación de aluminio hasta que este se fractura. El diámetro original de la probeta es de 0,5 pulgadas y la longitud nominal de 2,0 pulgadas. Los datos obtenidos con este experimento son la carga de tracción aplicada (P) y el incremento de longitud (ΔL). Los resultados se muestran en la Tabla P4.10. Utilizando un programa de hoja de cálculo, complete la tabla calculando el esfuerzo de ingeniería (σ) y la deformación de ingeniería (ε). Determine la tenacidad del material (u_t) calculando el área comprendida bajo la curva de esfuerzo–deformación, es decir,

$$u_t = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \, d\varepsilon$$

donde ε_f es la deformación en el punto de fractura. La integral anterior puede aproximarse numéricamente utilizando una técnica de integración trapezoidal:

$$u_t = \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})$$

Tabla P4.10

Observación Nº	P (libras)	ΔL (pulg.)	σ (psi)	ε (pulg./pulg.)	u_l (psi)
0	0	0			N/A
1	1181	0,0015			
2	2369	0,003			
3	3550	0,0045			
4	4738	0,0059			
5	5932	0,0075			
6	7008	0,0089			
7	8336	0,011			
8	9183	0,0146			
9	9698	0,018			
10	10.196	0,0235			
11	10.661	0,0332			
12	10.960	0,0449			
13	11.159	0,0565			
14	11.292	0,0679			
					u_t =

4.11 Explique el fenómeno de la corrosión galvánica del aluminio. ¿Cómo puede protegerse el aluminio de la corrosión galvánica?

4.6 Referencias

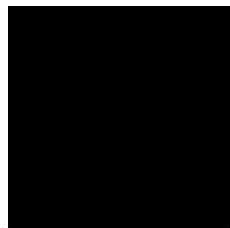
Aluminum Association. *Structural Design with Aluminum.* Washington, DC: The Aluminum Association, 1987.

Aluminum Association. *Aluminum Standards and Data, 1993.* Washington, DC: The Aluminum Association, 1993.

Budinski, K. G. *Engineering Materials, Properties and Selection.* Quinta edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

Reynolds Metals Company. *Reynolds Infrastructure.* Richmond, VA: Reynolds Metals Company, 1996.

5



ÁRIDOS

Los áridos tienen dos usos principales dentro del campo de la ingeniería civil: como material base para cimientos y pavimentos, y como ingrediente del hormigón de cemento portland y del hormigón asfáltico. Generalmente, en ingeniería civil el término *árido* hace referencia a una masa de piedra molida, grava, arena, etc., predominantemente compuesta de partículas individuales, pero incluyendo en algunos casos arcillas y sedimentos. El tamaño de partícula más grande en los áridos puede tener un diámetro de 150 mm (6 pulgadas), mientras que la partícula más pequeña puede ser de solo entre 5 y 10 micras. En este capítulo se presenta diversa información acerca de los áridos, en lo que hace referencia al campo de la construcción. No se abordan las características ni las propiedades de los suelos, dado que ese es el objetivo de los libros dedicados a la ingeniería geotécnica.

5.1 Fuentes de áridos

Entre las fuentes *naturales* de áridos se incluyen las canteras de grava y de piedra, y los depósitos fluviales. Generalmente, la *grava* proviene de canteras y depósitos fluviales, mientras que la *piedra triturada* se obtiene procesando la roca extraída de las canteras. Normalmente, los depósitos de grava también tienen que triturarse para obtener la forma, la textura y la distribución de tamaños necesaria (Figura 5.1).

Los áridos *fabricados* pueden obtenerse a partir de escorias de fundiciones de acero, así como de esquisto expandido y arcillas, para fabricar áridos ligeros. El hormigón pesado, utilizado para pantallas protectoras frente a la radiación, puede emplear escorias y rodamientos de acero como áridos. En el hormigón ligero utilizado para aislamiento, también pueden emplearse como áridos gránulos de espuma de estireno.



FIGURA 5.1 Extracción de áridos.

5.2 Clasificación geológica

Todos los áridos naturales son el resultado de la ruptura de grandes masas de roca. Los geólogos clasifican las rocas en tres grandes grupos: *ígneas, sedimentarias* y *metamórficas*. La acción volcánica produce rocas ígneas, mediante el endurecimiento o cristalización de material fundido, el magma. El magma se enfría en la superficie terrestre cuando queda expuesto al aire o al agua, o también puede enfriarse dentro de la corteza terrestre. El enfriamiento en superficie produce rocas ígneas *extrusivas*, mientras que el enfriamiento subterráneo da lugar a rocas ígneas *intrusivas*. En general, las rocas extrusivas se enfrían mucho más rápidamente que las rocas intrusivas. Por tanto, cabe esperar que las rocas ígneas extrusivas tengan un tamaño de grano pequeño, y puedan incluir, posiblemente, huecos llenos de aire y otros tipos de inclusiones. Las rocas ígneas intrusivas tienen tamaños de grano mayor y menos fallas. Las rocas ígneas se clasifican basándose en el tamaño de grano y en su composición. Las de grano grueso contienen gránulos más grandes de 2 mm y las de grano fino menores de 0,2 mm. La clasificación basada en la composición es una función del contenido en silicio, la gravedad específica, el color y la presencia de cuarzo libre.

Las rocas sedimentarias se forman a partir de depósitos de rocas desintegradas o de restos inorgánicos de animales marinos. El viento, el agua, los glaciares o la precipitación química directa transportan y depositan capas de material que se convierten en rocas sedimentarias, dando como resultado una estructura estratificada. Un proceso de

cementado natural une las partículas entre sí. La clasificación de este tipo de rocas se basa en el mineral predominante: calcáreas (piedra caliza, yeso, etc.), silíceas (pedernal, arenisca, etc.) y arcillosas (esquistos, etc.).

La rocas metamórficas se forman a partir de rocas ígneas o sedimentarias que vuelven a introducirse en la corteza terrestre y se ven sometidas al calor y a la presión, lo que provoca una reordenación de la estructura de granos. Generalmente, las rocas metamórficas tienen una estructura cristalina con granos cuyo tamaño varía de fino a grueso.

Los tres tipos de rocas se utilizan en aplicaciones de ingeniería civil. La idoneidad de los áridos procedentes de una fuente determinada deben evaluarse mediante una combinación de pruebas que permitan verificar las propiedades físicas, químicas y mecánicas, pruebas que deben complementarse con un examen mineralógico. La mejor predicción posible de la idoneidad de un árido para una determinada aplicación es la que se basa en el análisis del comportamiento histórico de ese árido en diseños similares.

5.3 Evaluación de las fuentes de áridos

Los ingenieros civiles seleccionan los áridos según su capacidad para satisfacer los requisitos específicos de cada proyecto, más que según su historia geológica. Las propiedades físicas y químicas de las rocas determinan la aceptabilidad de una fuente de áridos para un determinado proyecto de construcción. Estas características varían dentro de una misma cantera de roca o de grava, lo que hace que sea necesario muestrear y someter a prueba continuamente los materiales a medida que se producen los áridos.

Debido a la cantidad de áridos requeridos para una aplicación típica de ingeniería civil, su coste y disponibilidad son importantes a la hora de seleccionar una fuente de áridos. Frecuentemente, uno de los principales desafíos a los que se enfrentan los ingenieros de materiales en un proyecto es cómo utilizar los materiales localmente disponibles de la manera más económica posible.

Las fuentes potenciales de áridos suelen evaluarse de acuerdo con la calidad de las partículas de mayor tamaño, la naturaleza y cantidad de los materiales más finos y la composición granulométrica del árido. La extensión y calidad de la roca existente en una cantera suele estudiarse perforando testigos y realizando voladuras de prueba para evaluar cómo se rompe la roca, y triturando algunos materiales en el laboratorio para evaluar la composición granulométrica, la forma de las partículas, su adecuación, su durabilidad y la cantidad de material de gránulo fino. Los testigos se examinan petrográficamente para determinar su calidad general, su idoneidad para distintos usos y la cantidad de sustancias nocivas. Las canteras potenciales de grava y arena se evalúan tomando muestras y realizando pruebas de análisis granulométrico. La cantidad de grava y de guijarros de gran tamaño determina la necesidad de trituración, mientras que la cantidad de materiales más finos determina la necesidad de lavado. Los análisis petrográficos permiten evaluar la naturaleza de las partículas de áridos y la cantidad de material nocivo (Meininger y Nichols, 1990).

El precio y la disponibilidad son criterios universales que son relevantes para todas las aplicaciones de los áridos. Sin embargo, las características requeridas de los áridos dependerán de cómo vayan a utilizarse en la estructura; pueden emplearse como material base, en el hormigón asfáltico o en el hormigón de cemento portland.

5.4 Usos de los áridos

Como ya se ha mencionado, los áridos se utilizan principalmente como material base para cimientos y pavimentos y como ingredientes del hormigón de cemento portland y del hormigón asfáltico. Los áridos empleados como material base pueden añadir estabilidad a una estructura, proporcionar una capa de drenaje y proteger la estructura frente a los daños derivados del hielo (Figura 5.2). La estabilidad está en función de la fricción entre las partículas de los áridos y de la cantidad de material aglomerante a base de arcilla y sedimentos contenido en los huecos existentes entre las partículas de árido. Sin embargo, el incrementar el contenido de arcilla y sedimentos bloquea las vías de drenaje existentes entre las partículas de árido, inhibiendo así la capacidad del material para actuar como capa de drenaje.

En el hormigón de cemento portland, entre el 60% y el 75% del volumen y entre el 79% y el 85% del peso, está formado por áridos. Los áridos actúan como relleno para reducir la cantidad de pasta de cemento necesaria en la mezcla. Además, los áridos presentan una estabilidad volumétrica mayor que la pasta de cemento. Por tanto, la maxi-



FIGURA 5.2 Base compactada de áridos depositada antes de colocar la capa de asfalto de mezcla en caliente o la capa de hormigón de cemento portland en una carretera pavimentada.

mización de la cantidad de árido mejora, hasta un cierto punto, la calidad de la mezcla, además de abaratar su precio.

En el hormigón asfáltico, los áridos constituyen más del 80% del volumen y entre el 92% y el 96% de la masa. El cemento asfáltico actúa como aglomerante para mantener juntas las partículas de árido, pero no tiene la suficiente resistencia como para hacer que esas partículas se mantengan en su posición. Como resultado, la resistencia y la estabilidad del hormigón asfáltico depende principalmente de la fricción entre las partículas de árido y, en menor medida, del aglomerante.

5.5 Propiedades de los áridos

Las propiedades de los áridos están definidas por las características tanto de las partículas individuales como por las características del material combinado. Estas propiedades pueden describirse a su vez según sus características físicas, químicas y mecánicas, como se muestra en la Tabla 5.1 (Meininger y Nichols, 1990). Hay varias características de las partículas individuales que son importantes a la hora determinar si una fuente de áridos es adecuada para una aplicación concreta. Para diseñar mezclas de hormigón asfáltico y de hormigón de cemento portland se miden otras características (Goetz y Wood, 1960).

5.5.1 Forma y textura superficial de las partículas

La forma de las partículas individuales de áridos, Figuras 5.3 y 5.4, determina cómo podrá aglomerarse el material para obtener una configuración densa, así como la movilidad de las piedras dentro de una mezcla. A la hora de juzgar el material, hay que tener presentes dos consideraciones: la *angularidad* y la *foliación*. La trituración de rocas produce partículas angulares con esquinas afiladas. Debido a la meteorización, las esquinas de las partículas se rompen creando partículas *subangulares*. Cuando las partículas dan vueltas al ser arrastradas por el agua, las esquinas pueden volverse completamente *redondeadas*. Generalmente, las partículas de árido angulares dan lugar a capas de materiales con una mayor estabilidad que las partículas redondeadas. Sin embargo, es más difícil trabajar con partículas angulares que con redondeadas, dado que su forma hace más complicado que puedan deslizarse. La foliación describe la relación entre las dimensiones más pequeñas y más grandes de las partículas de árido.

La rugosidad de la superficie de las partículas desempeña un papel importante en la forma en que el árido se compacta y se fija con el material aglomerante. Los áridos con una textura rugosa son más difíciles de compactar para que adopten una configuración densa que los áridos de partículas *suaves*. Normalmente, la textura rugosa mejora la capacidad de aglomeración e incrementa la fricción entre partículas. Por regla general, la arena y la grava naturales tienen una textura suave, mientras que los áridos obtenidos por trituración tienen una textura rugosa.

TABLA 5.1 Propiedades básicas de los áridos (Meininger y Nichols, 1990)

Propiedad	Importancia relativa para el uso final*		
	Hormigón de cemento portland	Hormigón asfáltico	Cimentación
FÍSICAS			
Forma de la partícula (angularidad)	M	I	I
Forma de la partícula (foliación, elongación)	M	M	M
Tamaño de la partícula, máximo	M	M	M
Tamaño de la partícula, distribución	M	M	M
Textura superficial de la partícula	M	I	I
Estructura de poros, porosidad	I	M	N
Gravedad específica, absorción	I	M	M
Consistencia, meteorizabilidad	I	M	M
Peso unitario, huecos; suelto, compactado	I	M	M
Estabilidad volumétrica, térmica	M	N	N
Estabilidad volumétrica, húmedo/seco	M	N	M
Estabilidad volumétrica, congelación/descongelación	I	M	M
Integridad durante el calentamiento	N	M	N
Constituyentes nocivos	I	M	M
QUÍMICAS			
Solubilidad	M	N	N
Carga superficial	N	I	N
Afinidad con el asfalto	N	I	M
Reactivdad con productos químicos	I	N	N
Estabilidad volumétrica, química	I	M	M
Recubrimientos	M	M	N
MECÁNICAS			
Resistencia a la compresión	M	N	N
Tenacidad (resistencia de impacto)	M	M	N
Resistencia a la abrasión	M	M	M
Carácter de los productos de abrasión	M	M	N
Estabilidad de masa (rigidez, resiliencia)	N	I	I
Pulibilidad	M	M	N

* I = Muy importante; M = Moderadamente importante; N = No importante o importancia desconocida.

Para preparar hormigón de cemento portland, es deseable utilizar partículas de áridos redondeadas y suaves, para facilitar el trabajo con el hormigón fresco durante las operaciones de mezcla. Sin embargo, es más aconsejable emplear partículas angulares y rugosas para el hormigón asfáltico y para las bases de cimentación, con el fin de incrementar la estabilidad de los materiales una vez colocados en su lugar y también para reducir la aparición de baches. Las partículas de áridos con un alto nivel de foliación y alargadas no son deseables para la fabricación de hormigón asfáltico, ya que son difíciles de compactar durante las obras y se rompen fácilmente.

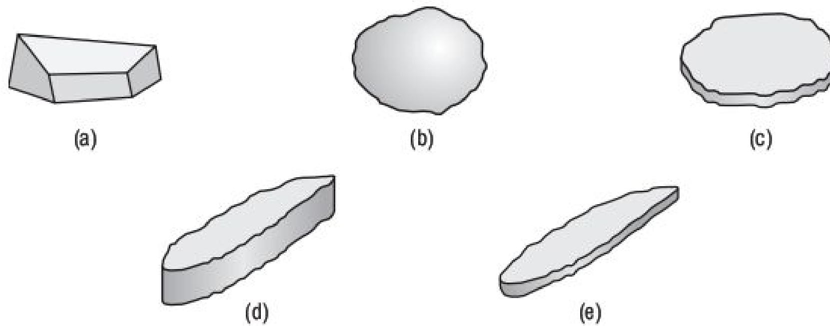


FIGURA 5.3 Formas de las partículas: (a) angular, (b) redondeada, (c) foliada, (d) elongada y (e) foliada y elongada.



FIGURA 5.4 Áridos angulares y redondeados.

Muchas de las especificaciones para áridos utilizados con el hormigón asfáltico requieren un porcentaje mínimo de áridos con caras trituradas y deben cumplir unos determinados *requisitos de textura* y *de forma*. Las partículas trituradas poseen una o más caras fracturadas por efecto mecánico y tienen, típicamente, un textura superficial rugosa. Para evaluar la angularidad y la textura superficial de áridos de grano grueso se recuenta el porcentaje de partículas con una o más caras trituradas dentro de una muestra representativa.

Para las partículas finas, la angularidad y la textura superficial pueden medirse indirectamente utilizando el método ASTM C1252, método de prueba para contenido hueco no compacto de áridos finos. En esta prueba, se vierte una muestra de árido fino sobre un cilindro de pequeño tamaño, haciendo pasar el árido a través de un embudo normal, como se muestra en la Figura 5.5. Determinando el peso del árido fino en el cilindro relleno de volumen conocido, puede calcularse el espacio vacío como la diferencia entre el volumen del cilindro y el volumen del árido fino que cabe en el cilindro. Este volumen del árido fino se calcula dividiendo el peso del árido fino entre su densidad. Cuanto mayor sea la cantidad de espacio vacío, más angular y más rugosa será la textura superficial del árido fino.

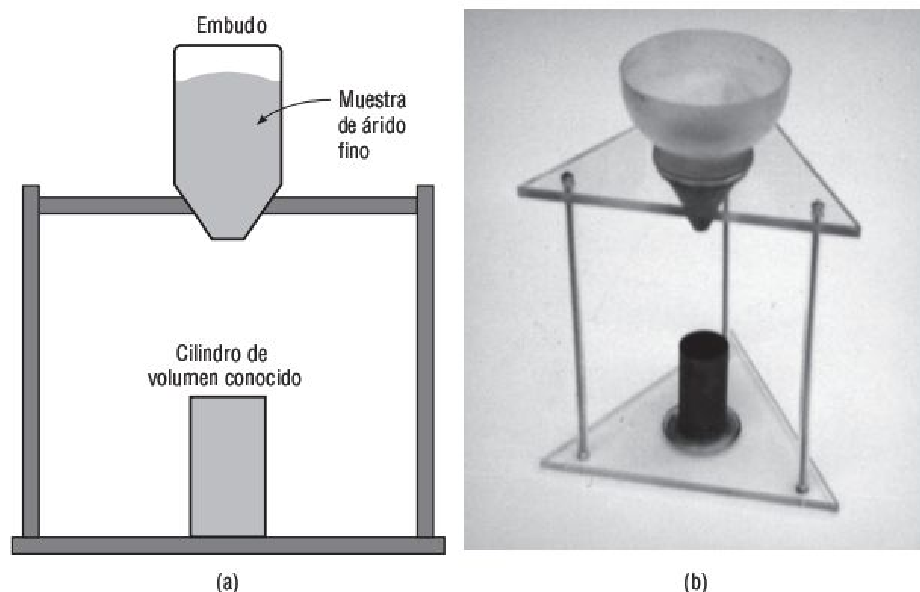


FIGURA 5.5 Aparato utilizado para medir la angularidad y la textura superficial del árido fino.

5.5.2 Consistencia y durabilidad

La capacidad de los áridos para resistir la meteorización se define como consistencia o durabilidad. Los áridos utilizados en las diversas aplicaciones de ingeniería civil deben ser consistentes y duraderos, particularmente si la estructura está sujeta a condiciones climatológicas adversas. La congelación del agua en los huecos existentes entre las partículas de áridos genera esfuerzos que pueden fracturar las piedras. La prueba de consistencia (ASTM C88) simula la meteorización impregnando los áridos en una solución de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio. Estos sulfatos provocan el recrecimiento de cristales dentro de las partículas, simulando el efecto de la congelación. La prueba se inicia con una muestra secada al horno y que se separa en fracciones de distinto tamaño. La muestra se somete a ciclos de impregnación en el sulfato durante 16 horas, seguidos de ciclos de secado. Normalmente, cada muestra se somete a cinco ciclos. Después, los áridos se lavan y se secan, se pesa cada pieza y se calcula la pérdida porcentual ponderada promedio para la muestra completa. El resultado se compara con los límites admisibles, para determinar si el árido es aceptable. Se trata de un proceso empírico de filtrado para nuevas fuentes de áridos, cuando no hay disponibles datos anteriores sobre la calidad del servicio.

La prueba de consistencia mediante congelación/descongelación (AASHTO T103) y expansión potencial con reacciones de hidratación (ASTM D4792) son pruebas alternativas de filtrado para evaluar la consistencia del producto. La durabilidad de los áridos en el hormigón de cemento portland puede probarse efectuando una congelación y descongelación rápidas (ASTM C666), llevando a cabo una dilatación

crítica por congelación (ASTM C671) y realizando una medida de resistencia a la congelación de áridos gruesos en hormigón celular mediante dilatación crítica (ASTM C682).

5.5.3 Tenacidad, dureza y resistencia a la abrasión

La capacidad de los áridos para resistir el efecto dañino de las cargas está relacionada con la dureza de las partículas de árido y se describe mediante la tenacidad o la resistencia a la abrasión. El árido debe resistir la trituración, la degradación y la desintegración cuando se acumula formando montones, cuando se mezcla para obtener hormigón de cemento portland u hormigón asfáltico, cuando se coloca y compacta, o cuando se ve sometido a cargas.

La prueba de abrasión Los Ángeles (ASTM C131, C535) evalúa la tenacidad y la resistencia a la abrasión de los áridos. En esta prueba, una muestra de áridos mezclada con una distribución de tamaño fijo se coloca en un gran tambor de acero con bolas de acero de tamaño estándar que actúan como carga abrasiva (véase la Figura 5.6). El tambor se hace girar normalmente durante 500 revoluciones. Después, el material se extrae de la máquina y se pasa a través de un tamiz que retiene todo el material original. El porcentaje de pérdida de peso será el número de abrasión LA. Se trata de una prueba empírica, es decir, los resultados de la prueba no tienen una base científica y solo tiene significado cuando la experiencia local define los criterios de aceptación.



FIGURA 5.6 Máquina de abrasión de Los Ángeles.

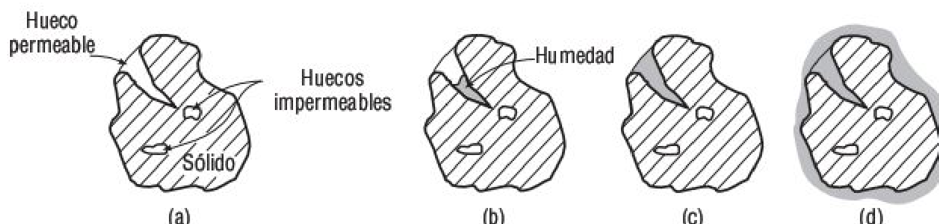


FIGURA 5.7 Huecos y absorción de humedad en los áridos: (a) completamente seco, (b) secado al aire, (c) saturado y superficialmente seco (SSD) y (d) húmedo.

5.5.4 Absorción

Aunque los áridos son inertes, pueden capturar agua y aglomerante asfáltico en los huecos superficiales. La cantidad de agua que absorbe el árido es importante en el diseño del hormigón de cemento portland, ya que la humedad capturada en los huecos del árido no estará disponible para mejorar la facilidad de trabajar el hormigón plástico y para reaccionar con el cemento. No existe un nivel específico de absorción del árido definido para los áridos empleados en el hormigón de cemento portland, pero es preciso evaluar la absorción del árido con el fin de determinar la cantidad apropiada de agua que hay que mezclar en el hormigón.

La absorción también es importante para el hormigón asfáltico, ya que el asfalto absorbido no estará disponible para actuar como aglomerante. Por tanto, los áridos altamente absorbentes requieren mayores cantidades de aglomerante asfáltico, lo que hace que la mezcla resulte menos económica. Por otro lado, es deseable una cierta absorción del asfalto para mejorar la unión entre el asfalto y el árido. Teniendo esto en cuenta, para el hormigón asfáltico se utilizan áridos de baja absorción.

La Figura 5.7 ilustra cuatro condiciones de humidificación para una partícula de árido. *Completamente seco* quiere decir que el árido no contiene ninguna humedad; esto requiere secar el árido en un horno hasta que recupere su masa original. Cuando el árido está *secado al aire*, puede contener algo de humedad pero el estado de saturación no está cuantificado. En una condición de *saturación con superficie seca (SSD)*, los huecos del árido están llenos de humedad pero el área superficial principal de las partículas del mismo está seca. La *absorción* se define como la humedad contenida en la condición SSD. Los áridos húmedos tienen un mayor contenido de humedad que la correspondiente a la condición SSD. La humedad libre es la diferencia entre el contenido real de humedad del árido y el contenido de humedad correspondiente a la condición SSD.

Problema de ejemplo 5.1

Una muestra de arena tiene las siguientes propiedades:

Masa húmeda = 625,2 g

Masa seca = 589,9 g
Absorción = 1,6%

Determine: (a) contenido total de humedad y (b) contenido de humedad libre.

Solución

a. Masa de agua = 625,2 − 589,9 = 35,3 g

$$\text{Contenido total de humedad} = \frac{35{,}3}{589{,}9} \times 100 = 6{,}0\%$$

b. Humedad libre = 6,0 − 1,6 = 4,4%

5.5.5 Gravedad específica

Las características de peso–volumen de los áridos no son un indicador importante de la cualidad del árido, pero sí que son importantes en el diseño de mezclas de hormigón. La *densidad*, la masa por unidad de volumen, podría utilizarse para estos cálculos. Sin embargo, la *gravedad específica*, la masa de un material dividida entre la masa de un volumen igual de agua destilada, se emplea más comúnmente. Se definen cuatro tipos de gravedad específica, basándose en cómo se consideran los huecos existentes en las partículas de árido. Tres de estos tipos (gravedad específica en *estado seco*, gravedad específica en *estado saturado con superficie seca* y gravedad específica *aparente*) están ampliamente aceptadas y se emplean en el diseño de mezclas de hormigón de cemento portland y de hormigón asfáltico. Estas magnitudes se definen de la forma siguiente:

$$\text{Gravedad específica en estado seco} = \frac{\text{Peso seco}}{(\text{Volumen total partículas})\ \gamma_a} = \frac{W_s}{(V_s + V_i + V_p)\gamma_a} \tag{5.1}$$

$$\text{Gravedad específica SSD} = \frac{\text{Peso SSD}}{(\text{Volumen total partículas})\ \gamma_a} = \frac{W_s + W_p}{(V_s + V_i + V_p)\gamma_a} \tag{5.2}$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{\text{Peso seco}}{(\text{Volumen no accesible al agua})\ \gamma_a} = \frac{W_s}{(V_s + V_i)\gamma_a} \tag{5.3}$$

donde

W_s = peso de sólidos.
V_s = volumen de sólidos.
V_i = volumen de los huecos impermeables al agua.
V_p = volumen de los huecos permeables al agua.
W_p = peso del agua en los huecos permeables cuando el árido está en la condición SSD.
γ_a = peso unitario del agua.

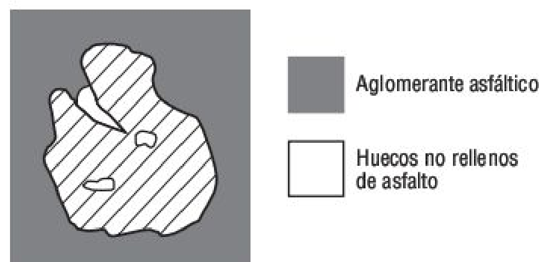


FIGURA 5.8 Partícula de árido sumergida en aglomerante asfáltico; no todos los huecos se llenan de asfalto.

La Figura 5.8 muestra que, cuando los áridos se mezclan con aglomerante asfáltico, solo una parte de los huecos permeables al agua se rellenan de asfalto. Por tanto, se define un cuarto tipo de gravedad específica, la *gravedad específica efectiva*, como:

$$\text{Gravedad específica efectiva} = \frac{\text{Peso seco}}{(\text{Volumen no accesible al asfalto})\,\gamma_a} = \frac{W_s}{(V_s + V_c)\gamma_a} \tag{5.4}$$

donde V_c es el volumen de los huecos no rellenos de aglomerante asfáltico.

Actualmente, no hay ningún método estándar que permita determinar directamente la gravedad específica efectiva de los áridos. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos ha definido un método para determinar esta magnitud para los áridos que absorben más de un 2,5% de agua.

La gravedad específica y la absorción de los áridos gruesos se determina de acuerdo con la especificación ASTM C127. En este procedimiento, se impregna una muestra representativa del árido durante 24 horas y se la pesa suspendida en agua. A continuación, se seca hasta la condición SSD y vuelve a pesarse. Por último, la muestra se seca hasta el peso original y se pesa de nuevo. La gravedad específica y la absorción se determinan como sigue:

$$\text{Gravedad específica en estado seco} = \frac{A}{B-C} \tag{5.5}$$

$$\text{Gravedad específica SSD} = \frac{B}{B-C} \tag{5.6}$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{A-C} \tag{5.7}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B-A}{A}(100) \tag{5.8}$$

donde

A = peso seco.

B = peso SSD.
C = peso sumergido.

ASTM C128 define el procedimiento para determinar la gravedad específica y la absorción de los áridos finos. Una muestra representativa se impregna en agua durante 24 horas y se vuelve a secar hasta alcanzar la condición SSD. Se coloca una muestra de 500 gramos en el material SSD dentro de un *picnómetro,* un matraz de volumen constante; después se añade agua a la marca de volumen constante del picnómetro y se vuelve a determinar el peso. A continuación, la muestra se seca y se pesa. La gravedad específica y la absorción quedan determinadas por las fórmulas siguientes:

$$\text{Gravedad específica en estado seco} = \frac{A}{B+S-C} \tag{5.9}$$

$$\text{Gravedad específica SSD} = \frac{S}{B+S-C} \tag{5.10}$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{B+A-C} \tag{5.11}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S-A}{A}(100) \tag{5.12}$$

donde

A = peso seco.
B = peso del picnómetro lleno de agua.
C = peso del picnómetro lleno de árido y agua.
S = peso en condición SSD de la muestra.

5.5.6 Peso unitario y huecos del árido

Para establecer las proporciones de las mezclas para hormigón de cemento portland, es necesario conocer el peso unitario del árido a granel. De acuerdo con el procedimiento ASTM C29, un contenedor rígido de volumen conocido se rellena de árido, compactándose el árido mediante varillas de apisonamiento, una máquina de sacudidas o una pala. El peso unitario del árido a granel se determina como:

$$\gamma_b = \frac{W_s}{V} \tag{5.13}$$

donde W_s es el peso de árido (piedra) y V es el volumen del contenedor.

Si la gravedad específica en estado seco del árido (G_{sb}) (ASTM C127 o C128) es conocida, el porcentaje de huecos entre partículas de áridos puede determinarse como sigue:

$$\%V_s = \frac{V_s}{V} \times 100 = \frac{W/\gamma_s}{W/\gamma_b} \times 100 = \frac{\gamma_b}{\gamma_s} \times 100 = \frac{\gamma_b}{G_{sb} \cdot \gamma_a} \times 100 \quad (5.14)$$

$$\% \text{ Huecos } = 100 - \%V_s$$

donde

V_s = volumen de árido.
γ_s = peso unitario del árido.
γ_b = peso unitario del árido a granel.
γ_a = peso unitario del agua.

Problema de ejemplo 5.2

Un cubo rígido se rellena de árido y éste se apisona para determinar su peso unitario. Los datos obtenidos son los siguientes:

Volumen del cubo = 1/3 pie^3
Peso del cubo vacío = 18,5 libras
Peso del cubo lleno de árido grueso seco y apisonado = 55,9 libras

a. Calcule el peso unitario del árido seco apisonado.
b. Si la gravedad específica en estado seco del árido es 2,630, calcule el porcentaje de huecos en el árido.

Solución

a. Peso unitario del árido seco y apisonado = (55,9 − 18,5)/0,333 = 112,3 libras/pie^3

b. Porcentaje de volumen de las partículas $= \frac{112{,}3}{2{,}630 \times 62{,}3} \times 100 = 68{,}5\%$

Porcentaje de huecos $= 100 - 68{,}5 = 31{,}5\%$

5.5.7 Resistencia y módulo

La resistencia del hormigón de cemento portland y del hormigón asfáltico no puede ser superior a la de los áridos constituyentes. Es difícil, y bastante poco común, probar la resistencia de las partículas de árido. Sin embargo, las pruebas realizadas en la muestra de la roca madre o en una muestra de árido a granel proporcionan una estimación indirecta de los correspondientes valores. La resistencia del árido es importante, generalmente, en el hormigón de alta resistencia y en la capa superficial de los pavimentos sometidos a un tráfico intenso. La resistencia de los áridos a la tracción varía entre 0,7 MPa y 16 MPa (100 psi y 2300 psi), mientras que la resistencia a la compresión está entre 35 MPa y 350 MPa (5000 psi y 50,000 psi) (Meininger y Nichols, 1990; Barksdale, 1991). Los registros de comportamiento en obras anteriores son una buena indicación de la adecuación de la resistencia del árido.

Por lo general, el módulo de elasticidad de los áridos no se mide. Sin embargo, los nuevos métodos mecanizados de diseño de pavimentos requieren una estimación del módulo de las bases de áridos utilizadas. La respuesta de los áridos a granel a los esfuerzos no es lineal y depende de la presión de confinamiento ejercida sobre el material. Puesto que el módulo se utiliza para el diseño de pavimentos, se emplean pruebas de carga dinámica para simular la magnitud y la duración de los esfuerzos que un camión en movimiento impone a una base de pavimento. Durante la prueba, a medida que se aplican esfuerzos a la muestra, la respuesta de deformación tiene dos componentes: una deformación recuperable o resiliente y una deformación permanente. Solo la parte resiliente de la deformación se utiliza, junto con el nivel de esfuerzo aplicado, para calcular el módulo del árido. Por tanto, los resultados se definen como el módulo de resiliencia, M_R.

En la prueba del módulo de resiliencia (AASHTO T292), una muestra cilíndrica preparada se coloca en una celda triaxial, como se muestra en la Figura 5.9. Una probeta con áridos gruesos tendrá típicamente 0,15 m (6 pulgadas) de diámetro por 0,30 m (12 pulgadas) de altura, mientras que las muestras de suelos tienen 71 mm (2,8 pulgadas) de diámetro por 142 mm (5,6 pulgadas) de altura. La probeta se somete a una presión de confinamiento especificada y a una carga axial repetida. Una serie de transductores de precisión, como por ejemplo los LVDT, miden la deformación axial. La prueba requiere una determinación del módulo para un rango de cargas axiales y presiones de confinamiento. El módulo de resiliencia es igual al esfuerzo axial dividido entre la deformación resiliente, para cada combinación de nivel de carga y presión de confinamiento. La prueba de módulo de resiliencia requiere la medida de cargas y deformaciones muy pequeñas y es, por tanto, difícil de llevar a cabo. Actualmente, este tipo de prueba está limitado principalmente a proyectos de investigación.

5.5.8 Granulometría y tamaño máximo

La granulometría describe la distribución de tamaños de las partículas de árido. Esta distribución es un atributo importante de los áridos. Los áridos de gran tamaño son económicamente ventajosos en el hormigón de cemento portland y el hormigón asfáltico, ya que tienen menor área superficial y, por tanto, requieren menos aglomerante. Sin embargo, las mezclas de árido grueso, ya sean de hormigón asfáltico o de hormigón de cemento portland son más toscas y es más difícil trabajar con ellas en el punto de colocación. Por tanto, una serie de consideraciones de construcción, como la capacidad de los equipos, las dimensiones de los elementos constructivos, el espacio disponible entre los elementos de la armadura de acero y el espesor de las capas, limitan el tamaño máximo de las partículas de árido.

Se utilizan dos definiciones para describir el tamaño máximo de partícula en una mezcla de áridos:

Tamaño máximo del árido: el tamaño de cedazo más pequeño a través del cual puede pasar el 100% de las partículas de la muestra de árido.

Tamaño nominal máximo del árido: el cedazo de mayor tamaño que retiene parte de las partículas del árido, pero generalmente no más del 10%.

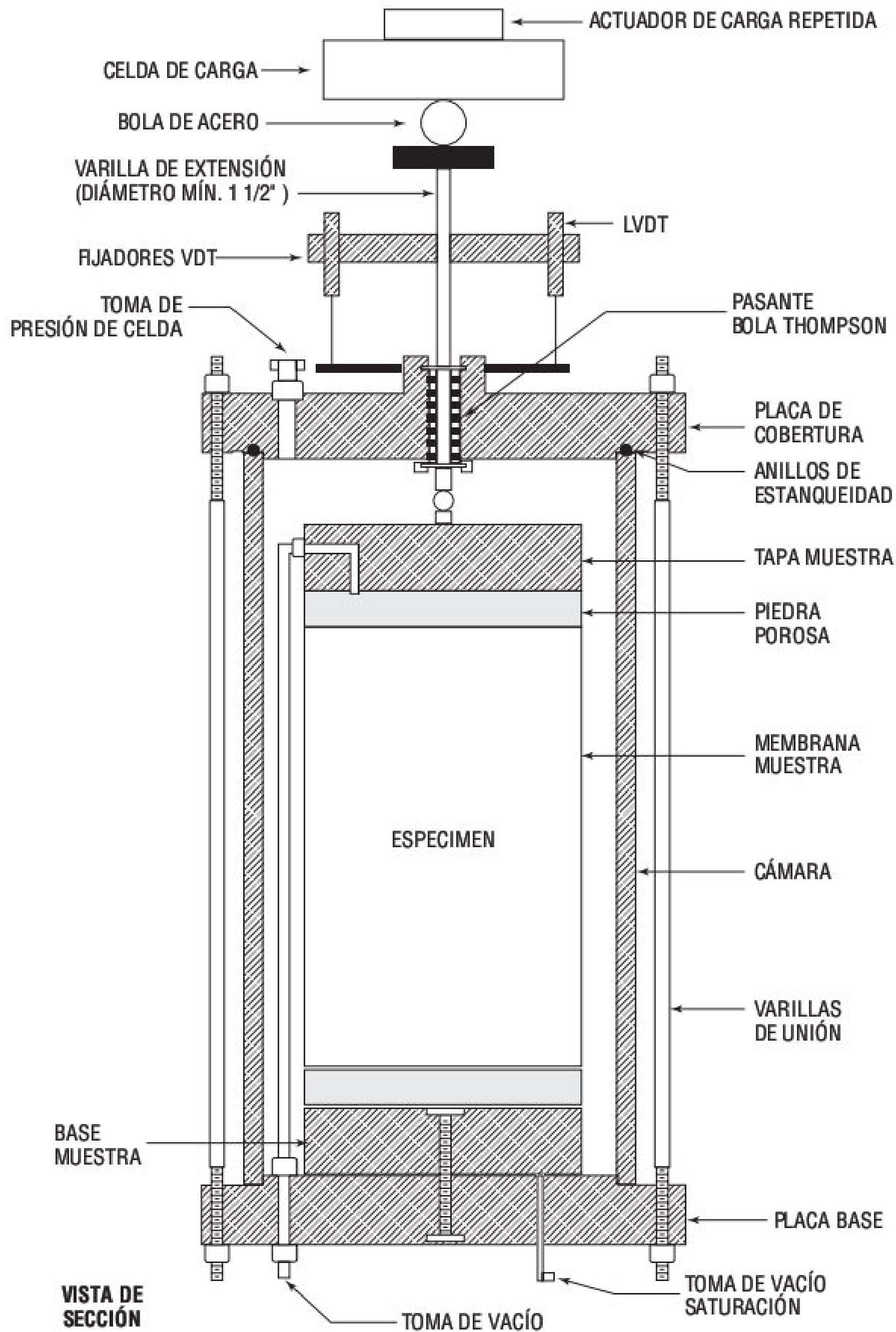


FIGURE 5.9 Cámara triaxial con LVDT externo y celda de carga.

Algunos organismos de normalización definen el tamaño máximo de árido como dos números más que el primer cedazo capaz de retener más del 10% del material,



FIGURA 5.10 Vibradora de cedazos para muestras de áridos.

mientras que el tamaño nominal máximo es un número más que el primer cedazo capaz de retener el 10% del material (Instituto del asfalto, 1995; McGennis *et al.*, 1995).

Análisis granulométrico La granulometría del árido se evalúa haciéndole pasar a través de una serie de cedazos, como se muestra en la Figura 5.10 (ASTM C136, E11). Los cedazos retienen todas las partículas que sean más grandes que los agujeros, mientras que las partículas más pequeñas pasarán a través del mismo. Las descripciones métricas de los cedazos se basan en los tamaños de las aberturas medidas en milímetros. Los cedazos menores de 0,6 mm pueden describirse en milímetros o micras. En unidades americanas, los cedazos con aberturas mayores de 1/4 de pulgada se designan mediante el tamaño de la abertura. Las longitudes de los lados de las aberturas cuadradas de un cedazo de dos pulgadas son de dos pulgadas, medidas entre los alambres. Esto es igual al diámetro de una esfera inscrita en ese cuadrado, es decir, que toque exactamente cada lado del cuadrado en su punto central. Los cedazos de menos de 1/4 de pulgada se especifican mediante el número de aberturas uniformes por pulgada lineal (un cedazo del número ocho tiene ocho aberturas por pulgada, o 64 agujeros por pulgada cuadrada).

Los resultados del análisis granulométrico se describen mediante los porcentajes acumulados de áridos que pasan a través de, o que son retenidos por, un tamaño de cedazo específico. Los porcentajes se redondean al número entero más próximo, salvo si el porcentaje que pasa por el cedazo de 0,075 mm (Nº 200) es inferior al 10%, en cuyo caso se redondea al múltiplo del 0,1% más próximo. Los resultados de los análisis granulométricos normalmente se dibujan en una gráfica semilogarítmica, como las mostradas en las Figuras 5.11 y A.21.

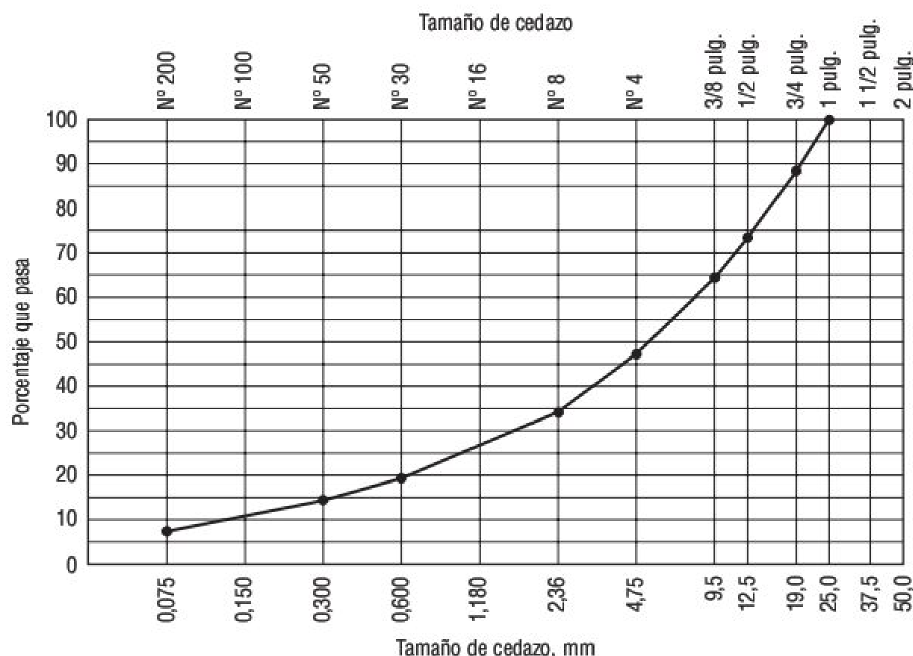


FIGURA 5.11 Diagrama granulométrico semilogarítmico para áridos, que muestra un ejemplo de análisis granulométrico. Véase la Tabla 5.2.

TABLA 5.2 Cálculo de la distribución de áridos requerida para conseguir una densidad máxima.

Cedazo	$P_i = 100\ (d_i/D)^{0,45}$
25 mm (1 pulg.)	100
19 mm (3/4 pulg.)	88
12,5 mm (1/2 pulg.)	73
9,5 mm (3/8 pulg.)	64
4,75 mm (Nº 4)	47
2,36 mm (Nº 8)	34
0,60 mm (Nº 30)	19
0,30 mm (Nº 50)	14
0,075 mm (Nº 200)	7,3

Los áridos normalmente se clasifican por su tamaño como áridos gruesos, áridos finos y áridos en polvo. La ASTM define los áridos gruesos como partículas que son retenidas por el cedazo de 4,75 mm (Nº 4), los áridos finos como partículas que pasan por el cedazo de 4,75 mm y los áridos en polvo como materiales que pasan en su mayor parte por el cedazo de 0,075 mm (Nº 200).

Granulometría de máxima densidad La densidad de una mezcla de áridos es función de la distribución de tamaños de la muestra de áridos. En 1907, Fuller estableció una relación que permite determinar la distribución de áridos que proporciona la máxima densidad o la mínima cantidad de huecos. Dicha fórmula es:

$$P_i = 100\left(\frac{d_i}{D}\right)^n \tag{5.15}$$

donde

P_i = porcentaje que pasa por un cedazo de tamaño d_i.
d_i = tamaño del cedazo en cuestión.
D = tamaño máximo del árido.

El valor del exponente n recomendado por Fuller es de 0,5. En la década de 1960, la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos recomendó un valor de 0,45 para n e introdujo el diagrama de granulometría de "potencia 0,45", que puede verse en las Figuras 5.12 y A.22, y que está diseñado para producir una línea recta para el caso de granulometrías de máxima densidad (Federal Highway Administration, 1988). En la Tabla 5.2 se muestra un cálculo de ejemplo de la distribución de tamaños de partículas requerida para obtener una densidad máxima. Observe que el análisis granulométrico de la Tabla 5.2 está dibujado en ambos diagramas de granulometría, en las Figuras 5.11 y 5.12.

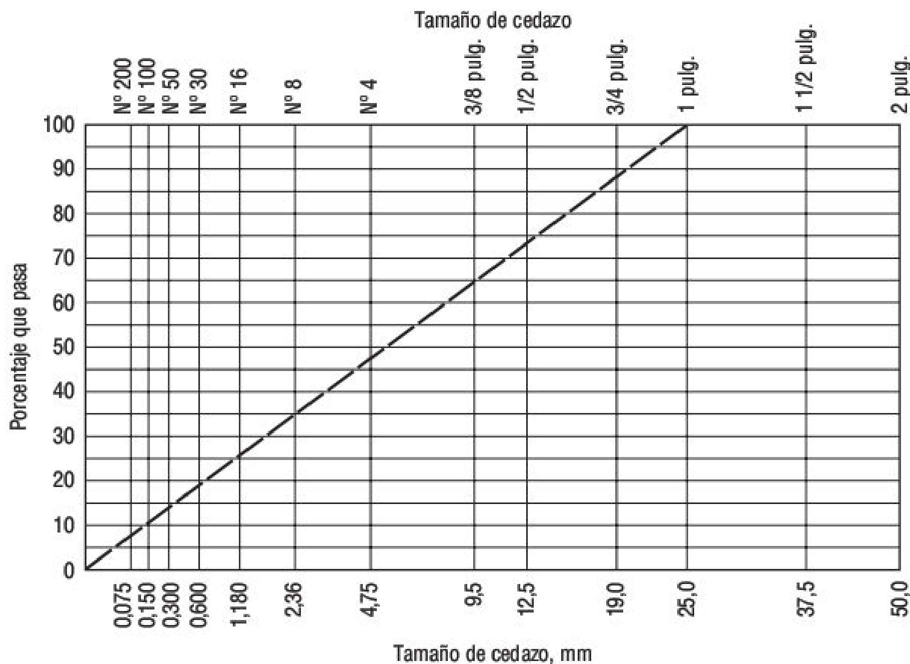


FIGURA 5.12 Diagrama de granulometría de potencia 0,45 de la Administración Federal de Autopistas, que muestra la granulometría de densidad máxima para un tamaño máximo de 25 mm. Véase la Tabla 5.2.

Frecuentemente, en muchas aplicaciones de construcción se desea una granulometría densa, por su alta estabilidad, pero no necesariamente la máxima densidad posible. El uso de una granulometría de alta densidad también implica que los áridos ocuparán la mayor parte del volumen del material, limitando el contenido en aglomerante y reduciendo así el coste. Por ejemplo, los áridos para el hormigón asfáltico deben ser densos, aunque también deben tener suficientes huecos en el árido mineral para dejar sitio al aglomerante, así como sitio para los huecos de la propia mezcla.

Problema de ejemplo 5.3

Se realiza una prueba de análisis granulométrico en una muestra de árido fino, obteniendo los siguientes resultados:

Cedazo, mm	4,75	2,36	2,00	1,18	0,60	0,30	0,15	0,075	bandeja
Cantidad retenida, g	0	33,2	56,9	83,1	151,4	40,4	72,0	58,3	15,6

Calcule el porcentaje de material que pasa por cada cedazo y dibuje un diagrama granulométrico de potencia 0,45, utilizando un programa de hoja de cálculo.

Solución

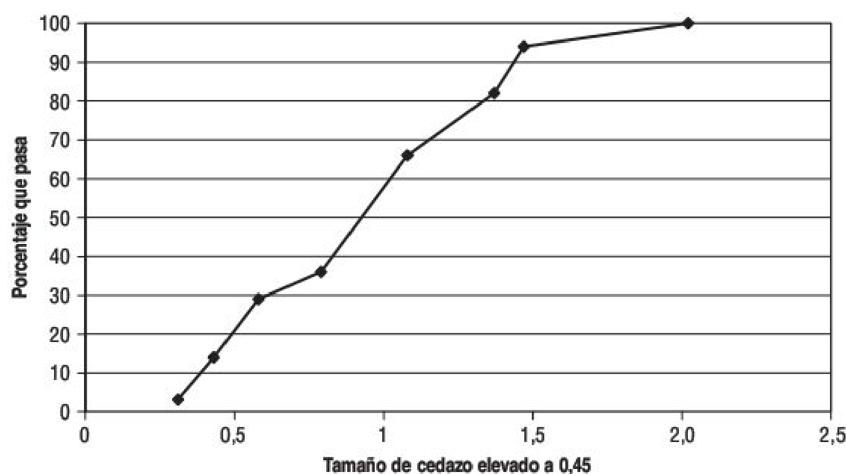
Tamaño de cedazo	Cantidad retenida, g (a)	Cantidad retenida acumulada, g (b)	Porcentaje retenido acumulado (c) = (b) x 100/Total	Porcentaje que pasa* (d) = 100 - (c)
4,75 mm (Nº 4)	0	0	0	100
2,36 mm (Nº 8)	33,2	33,2	6	94
2,00 mm (Nº 10)	56,9	90,1	18	82
1,18 mm (Nº 16)	83,1	173,2	34	66
0,60 mm (Nº 30)	151,4	324,6	64	36
0,30 mm (Nº 50)	40,4	365,0	71	29
0,15 mm (Nº 100)	72,0	437,0	86	14
0,075 mm (Nº 200)	58,3	495,3	96,9	3,1
Bandeja	15,6	510,9	100	
Total	510,9			

* El porcentaje que pasa se redondea al número entero más próximo, excepto para el material del cedazo de 0,075 mm (Nº 200), que se redondea al múltiplo más próximo del 0,1 %.

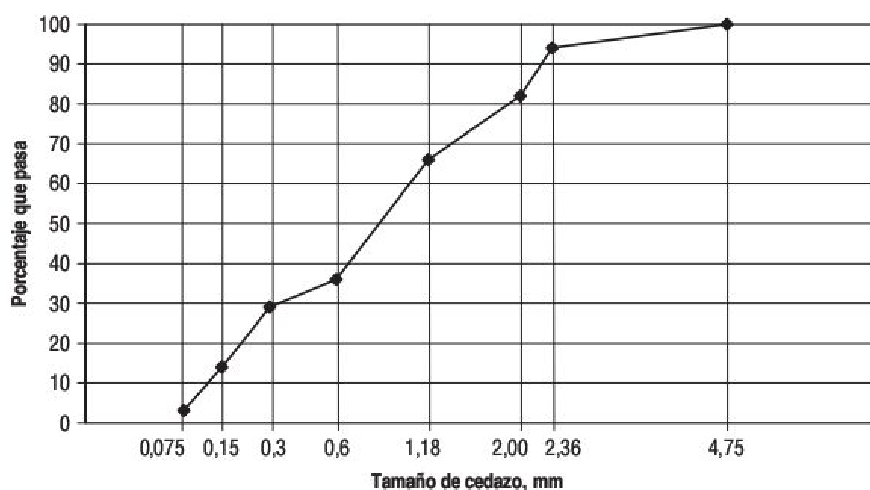
El primer paso para dibujar la gráfica consiste en elevar el tamaño de cedazo a la potencia 0,45, utilizando los tamaños de cedazo métrico, como se muestra en la tabla de la página siguiente.

Después se utiliza la función de gráfica de dispersión x-y para dibujar en el eje y el porcentaje que pasa en función del tamaño de cedazo elevado a 0,45, y se obtiene la primera de las gráficas de la página siguiente.

Tamaño de cedazo (mm)	Tamaño elevado a 0,45	Porcentaje que pasa
4,75	2,02	100
2,36	1,47	94
2	1,37	82
1,18	1,08	66
0,6	0,79	36
0,3	0,58	29
0,15	0,43	14
0,075	0,31	3,1



Puesto que el tamaño de cedazo elevado a 0,45 no es un número significativo, los valores del eje se borran y se utiliza la función de recuadro de texto para etiquetar el eje x con los valores reales de cedazo. Además, se emplea la herramienta de dibujo para añadir líneas verticales entre el eje y los puntos de datos. La gráfica que se obtiene es la siguiente:



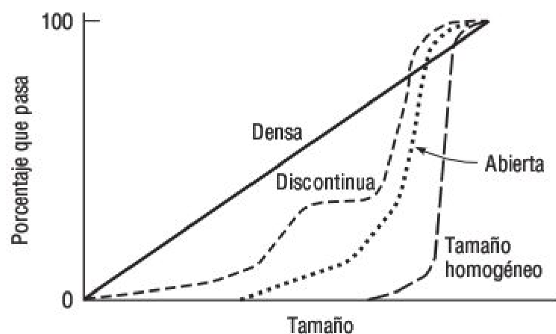


FIGURA 5.13 Tipos de distribuciones de tamaño de las partículas de árido dibujados en un diagrama granulométrico de potencia 0,45.

Otros tipos de análisis granulométricos Además de la distribución de densidad máxima (es decir, de granulometría *correcta*), los áridos pueden tener otras distribuciones características, como se muestra en la Figura 5.13. Una distribución de *tamaño homogéneo* tiene una mayoría de partículas que atraviesan un cedazo y quedan retenidas en el siguiente cedazo más pequeño. Esto quiere decir que la mayoría de las partículas tienen prácticamente el mismo diámetro; su curva granulométrica es casi vertical. Los áridos con granulometría de tamaño homogéneo tendrán una buena permeabilidad, pero una mala estabilidad, y se emplean en aplicaciones tales como juntas baratas para pavimentos. Los áridos con *granulometría discontinua* son áridos en los que faltan uno o más tamaños de partícula. Su curva granulométrica tiene una sección casi horizontal, que indica que hay porcentajes muy similares del árido que pasan a través de cedazos de diferente tamaño. Los áridos de *granulometría abierta* son áridos en los que faltan los tamaños pequeños de partícula que servirían para tapar los huecos existentes entre las partículas de mayor tamaño. Puesto que existirá una gran cantidad de huecos, el material será extremadamente permeable, pero posiblemente no tendrá una buena estabilidad.

Como se muestra en la Tabla 5.3, la cantidad de partículas finas tiene una gran influencia sobre las características de los materiales base de áridos. Los áridos con un porcentaje de partículas finas igual a la cantidad requerida para obtener una densidad máxima prsentan una estabilidad y una densidad excelentes, pero pueden tener problemas de permeabilidad, susceptibilidad al hielo, manipulación y cohesión.

Especificaciones granulométricas Las especificaciones granulométricas definen los porcentajes acumulados máximo y mínimo de material que deben pasar por cada cedazo. Los áridos suelen describirse como gruesos o finos, dependiendo de si el material queda retenido predominantemente, o por el contario pasa en su mayor parte, a través de un cedazo de 4,75 mm (Nº 4).

El hormigón de cemento portland requiere especificaciones diferentes para áridos gruesos y finos. Las especificaciones ASTM C33 para áridos finos para hormigón se pro-

TABLA 5.3 Efecto de la cantidad de partículas finas en las propiedades relativas de los materiales base de áridos.

Característica	Sin partículas finas (abierto o limpio)	Granulometría correcta (denso)	Gran cantidad de partículas finas (sucio o rico)
Estabilidad	Media	Excelente	Mala
Densidad	Baja	Alta	Baja
Permeabilidad	Permeable	Baja	Impermeable
Susceptibilidad al hielo	No	Es posible	Sí
Manipulación	Difícil	Media	Fácil
Cohesión	Mala	Media	Grande

TABLA 5.4 Especificaciones granulométricas ASTM de áridos finos para hormigón de cemento portland (Copyright ASTM, reimpreso con su permiso).

Cedazo	Porcentaje que pasa
9,5 mm (3/8")	100
4,75 mm (Nº 4)	95–100
2,36 mm (Nº 8)	80–100
1,18 mm (Nº 16)	50–85
0,60 mm (Nº 30)	25–60
0,30 mm (Nº 50)	10–30
0,15 mm (Nº 100)	2–10

porcionan en la Tabla 5.4. La Tabla 5.5 muestra la especificaciones granulométricas de ASTM C33 para áridos gruesos de hormigón.

Generalmente, los organismos reguladores locales desarrollan sus propias especificaciones para la granulometría de los áridos empleados en el hormigón asfáltico. La Tabla 5.6 detalla los requisitos para los asfaltos de mezcla en caliente Superpave (McGennis *et al.*, 1995). Estas especificaciones definen el rango granulométrico aceptable para hormigón asfáltico, con el fin de diseñar las mezclas adecuadamente. Observe que el porcentaje de material que pasa por el cedazo de 0,075 mm (Nº 200), las partículas finas o el árido en polvo, está cuidadosamente controlado para el hormigón asfáltico, debido a su influencia en las propiedades de la mezcla.

Una vez establecida la granulometría del árido para el diseño de mezclas de hormigón asfáltico para un proyecto, el proveedor debe suministrar áridos que se encuentren dentro una estrecha banda alrededor de la línea granulométrica establecida para el diseño de las mezclas. Por ejemplo, el Departamento de transportes de Arizona (Estados Unidos) solo abona la factura completamente al proveedor si la granulometría se

TABLA 5.5 Requisitos granulométricos para áridos gruesos para hormigón (ASTM C-33) (Copyright ASTM, reimpreso con su permiso).

		Cantidades más finas de cada cedazo de laboratorio (aberturas cuadradas), Porcentaje en peso												
Tam. Nº	Tamaño nominal	4" (100 mm)	3 1/2" (90 mm)	3" (75 mm)	2 1/2" (63 mm)	2" (50 mm)	1 1/2" (37,5 mm)	1" (25,0 mm)	3/4" (19,0 mm)	1/2" (12,5 mm)	3/8" (9,5 mm)	Nº 4 (4,75 mm)	Nº 8 (2,36 mm)	Nº 16 (1,18 mm)
1	3 1/2 a 1 1/2" (90 a 37,5 mm)	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
2	2 1/2 a 1 1/2" (63 a 37,5 mm)	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
3	2 a 1" (50 a 25,0 mm)	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5	...	...	...	...
357	2" a Nº 4 (50 a 4,75 mm)	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...
4	1 1/2 a 3/4" (37,5 a 19 mm)	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...
467	1 1/2" a Nº 4 (37.5 a 4,75 mm)	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...

TABLA 5.5 (Continuación)

Tam. Nº	Tamaño nominal	Cantidades más finas de cada cedazo de laboratorio (aberturas cuadradas), Porcentaje en peso												
		4" (100 mm)	3 1/2" (90 mm)	3" (75 mm)	2 1/2" (63 mm)	2" (50 mm)	1 1/2" (37,5 mm)	1" (25,0 mm)	3/4" (19,0 mm)	1/2" (12,5 mm)	3/8" (9,5 mm)	Nº 4 (4,75 mm)	Nº 8 (2,36 mm)	Nº 16 (1,18 mm)
5	1 a 1/2". (25,0 a 12,5 mm)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...
56	1 a 3/8". (25,0 a 9,5 mm)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...
57	1" a Nº 4 (25,0 a 4,75 mm)	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...
6	3/4" a 3/8" (19,0 a 9,5 mm)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...
67	3/4" a Nº 4 (19,0 a 4,75 mm)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...
7	1/2" a Nº 4 (12,5 a 4,75 mm)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...
8	3/8" a Nº 8 (9,5 a 2,36 mm)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

TABLA 5.6 Requisitos granulométricos de los áridos para asfalto de mezcla en caliente Superpave (AASHTO MP-2).

Tamaño cedazo, mm (pulg.)	Tamaño máximo nominal (mm)					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
50 (2 pulg.)	100	—	—	—	—	—
37,5 (1 1/2 pulg.)	90–100	100	—	—	—	—
25 (1 pulg.)	90 max	90–100	100	—	—	—
19 (3/4 pulg.)	—	90 max	90–100	100	—	—
12,5 (1/2 pulg.)	—	—	90 max	90–100	100	100
9,5 (3/8 pulg.)	—	—	—	90 max	90–100	95–100
4,75 (Nº 4)	—	—	—	—	90 max	90–100
2,36 (Nº 8)	15–41	19–45	23–49	28–58	32–67	—
1,18 (Nº 16)	—	—	—	—	—	30–60
0,075 (Nº 200)	0,0–6,0	1,0–7,0	2,0–8,0	2,0–10,0	2,0–10,0	6,0–12,0

encuentra dentro de los siguientes límites, con respecto a la granulometría aceptada para el diseño de las mezclas:

Tamaño de cedazo	Desviaciones admitidas para cobrar el precio fijado
9,5 mm (3/8 pulg.) y superior	±3%
2,36 a 0,45 mm (No. 8 a Nº 40)	±2%
0,075 mm (Nº 200)	±0,5%

Módulo de finura El *módulo de finura* es una medida de la granulometría de los áridos finos y se utiliza principalmente en el diseño de mezclas para hormigón de cemento portland. También puede emplearse como control de calidad diario en la producción de hormigón. El módulo de finura es igual a la centésima parte de la suma del porcentaje de peso acumulado retenido en los cedazos de 0,15 mm; 0,3 mm; 0,6 mm; 1,18 mm; 2,36 mm; 4,75 mm; 9,5 mm; 19,0 mm; 37,5 mm; 75 mm y 150 mm (Nº 100, 50, 30, 16, 8 y 4, y de 3/8, 3/4, 1 1/2, 3 y 6 pulgadas). Cuando se determina el módulo de finura para áridos finos no se utilizan cedazos mayores que 9,5 mm (3/8 pulgada). El módulo de finura debe estar comprendido en el rango de 2,3 a 3,1, representando los números más altos áridos más gruesos. La Tabla 5.7 ilustra los cálculos del módulo de finura.

TABLA 5.7 Ejemplo de cálculo del módulo de finura.

Tamaño de cedazo	Porcentaje de fracción individual retenida, por peso	Porcentaje acumulado retenido por peso	Porcentaje que pasa por peso
9,5 mm (3/8 pulg.)	0	0	100
4,75 mm (Nº 4)	2	2	98
2,36 mm (Nº 8)	13	15	85
1,18 mm (Nº 16)	25	40	60
0,60 mm (Nº 30)	15	55	45
0,30 mm (Nº 50)	22	77	23
0,15 mm (Nº 100)	20	97	3
bandeja	3	100	0
Total	100		

Módulo de finura = 286/100 =2,86

Problema de ejemplo 5.4

Calcule el módulo de finura para los resultados del análisis granulométrico del Problema de ejemplo 5.3.

Solución
De acuerdo con la definición del módulo de finura no se incluyen los cedazos de 2,00 y 0,075 mm (Números 10 y 200).

$$\text{Módulo de finura} = \frac{6+34+64+71+86}{100} = 2,61$$

Mezcla de áridos para cumplir las especificaciones Generalmente, resulta poco probable que una única fuente de áridos permita satisfacer los requisitos granulométricos para las mezclas de hormigón de cemento portland y de hormigón asfáltico. Por ello, suele ser necesario mezclar áridos de dos o más fuentes para satisfacer las especificaciones. La Figura 5.14 muestra un método gráfico para seleccionar la combinación de dos áridos que permita satisfacer una determinada especificación. La Tabla 5.8 presenta los datos utilizados en la Figura 5.14. Para determinar una mezcla satisfactoria de áridos mediante el método gráfico es necesario llevar a cabo los pasos siguientes (Instituto del asfalto, 1995):

1. Dibuje en el eje de la derecha los porcentajes que pasan por cada cedazo para el árido A y en el eje de la izquierdo, los porcentajes correspondientes al árido B. En la Figura 5.14 se han indicado como círculos huecos.

TABLA 5.8 Ejemplo de análisis de mezcla de áridos por el método gráfico.

Cedazo	19 mm (3/4 pulg.)	12.5mm (1/2 pulg.)	9.5mm (3/8 pulg.)	4,75mm (Nº 4)	2,36mm (Nº 8)	0,60mm (Nº 30)	0,30mm (Nº 50)	0,15 mm (Nº100)	0,075mm (Nº 200)
Espec.	100	80–100	70–90	50–70	35–50	18–29	13–23	8–16	4–10
Árido A	100	90	59	16	3	0	0	0	0
Árido B	100	100	100	96	82	51	36	21	9
Mezcla	100	95	80	56	43	26	18	11	4,5

Nota: los números mostrados indican el porcentaje que pasa por cada cedazo.

2. Para cada tamaño de cedazo, conecte los ejes izquierdo y derecho.
3. Dibuje los límites que impone la especificación en cada una de las líneas de los distintos cedazos. Por ejemplo, sitúe sendas marcas en la línea del cedazo de 9,5-mm (3/8 pulg.) en los puntos correspondientes a los porcentajes del 70% y el 90% del eje vertical. Estos puntos se muestran como círculos rellenos en la Figura 5.14.
4. Conecte los puntos de límite superior e inferior de cada línea de cedazo.
5. Dibuje líneas verticales que pasen a través del punto situado más a la derecha de la línea del límite superior y del punto más a la izquierda de la línea del límite inferior. Si las líneas de los límites inferior y superior se solapan, significa que ninguna combinación de áridos permitirá satisfacer las especificaciones.
6. Cualquier línea vertical dibujada entre las dos líneas verticales trazadas en el paso anterior se corresponderá con una mezcla de áridos que permitirá satisfacer las especificaciones. La intersección con el eje superior define el porcentaje de árido B necesario para la mezcla. La proyección sobre el eje inferior define el porcentaje necesario del árido A.
7. La proyección horizontal de las intersecciones de la línea de mezcla y de las líneas de cedazo proporciona una aproximación de la granulometría del árido mezclado. La Figura 5.14 muestra que una mezcla 50-50 de los áridos A y B dará como resultado una mezcla con un 43% de material que pasará a través del cedazo de 2,36 mm (Nº 8). La granulometría de la mezcla se muestra en la última línea de la Tabla 5.8.

Cuando son necesarios más de dos áridos, puede repetirse el procedimiento gráfico de forma iterativa. Sin embargo, normalmente se emplea un método de prueba y error para determinar las proporciones. La ecuación básica para las mezclas es:

$$P_i = Aa + Bb + Cc + \ldots \tag{5.16}$$

donde

P_i = porcentaje del material mezclado que pasa por el cedazo de tamaño i.

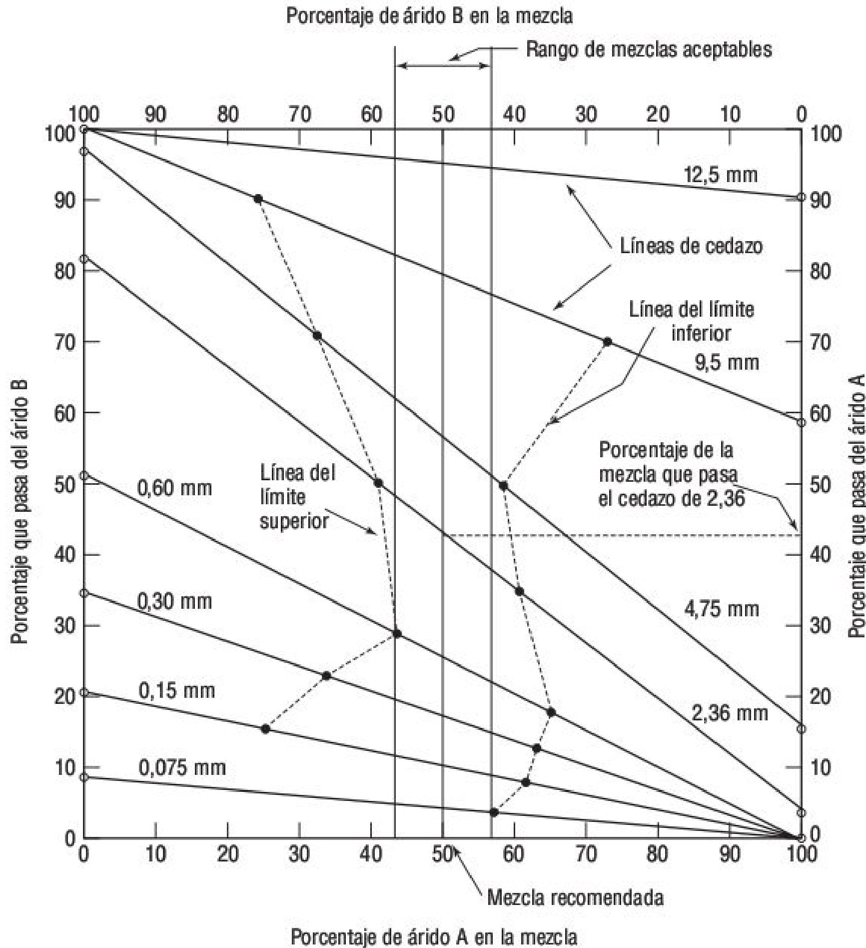


FIGURA 5.14 Método gráfico para determinar una mezcla de áridos que satisfaga los requisitos granulométricos. Véase la Tabla 5.8.

A, B, C, . . . = porcentaje de los áridos A, B, C, . . ., que pasan por el cedazo *i*.

a, b, c, . . . = fracciones decimales según peso, para los áridos A, B y C, siendo el total igual a 1,00.

La Tabla 5.9 ilustra estos cálculos para dos fuentes de áridos. La tabla muestra el rango especificado y la granulometría deseada (u objetivo) que normalmente se corresponde con el punto medio de la especificación. Se supone un porcentaje de prueba A de cada fuente de árido y se multiplica por el porcentaje de material que pasa por cada cedazo. Estas granulometrías se suman para obtener el porcentaje compuesto de material de mezcla que pasa por cada cedazo. La granulometría de la mezcla se compara con el rango especificado para determinar si la mezcla es aceptable. Con un poco de práctica, pueden resolverse fácilmente mezclas de cuatro áridos. Estos cálculos se realizan sin problemas utilizando un programa de hoja de cálculo.

TABLA 5.9 Ejemplo de análisis de mezcla de áridos según el método iterativo.

Cedazo	12,5 mm (1/2 pulg.)	9,5 mm (3/8 pulg.)	4,75 mm (Nº 4)	2,00 mm (Nº 10)	0,425 mm (Nº 40)	0,180 mm (Nº 80)	0,075 mm (Nº 200)
Especificación	100	95–100	70–85	55–70	20–40	10–20	4–8
Granulometría objetivo	100	98	77,5	62,5	30	15	6
% árido A (A)	100	100	98	90	71	42	19
% árido B (B)	100	94	70	49	14	2	1
30% A (a)	30	30	29,4	27	21,3	12,6	5,7
70% B (b)	70	65,8	49	34,3	9,8	1,4	0,7
Mezcla (P_i)	100	96	78	61	31	14	6,4

Propiedades de los áridos mezclados Cuando se mezclan dos o más áridos procedentes de diferentes fuentes, algunas de las propiedades de la mezcla pueden calcularse a partir de las propiedades de los componentes individuales. Con la excepción de la gravedad específica y de la densidad, las propiedades de la mezcla son simplemente los promedios ponderados de las propiedades de los componentes. Esta relación puede expresarse como sigue:

$$X = P_1X_1 + P_2X_2 + P_3X_3 + \ldots \tag{5.17a}$$

donde

X = propiedad compuesta de la mezcla.
X_1, X_2, X_3 = propiedades de las fracciones 1, 2, 3
P_1, P_2, P_3 = fracciones decimales según el peso de los áridos 1, 2, 3 utilizados en la mezcla, siendo el total igual a 1,00

Esta ecuación se aplica a propiedades tales como la angularidad, la absorción, la resistencia y el módulo.

Problema de ejemplo 5.5

Áridos gruesos procedentes de dos montones que tienen una angularidad de árido grueso (caras trituradas) del 40% y el 90%, respectivamente, se mezclan con una relación 30:70 según peso. ¿Cuál es el porcentaje de caras trituradas en la mezcla de áridos?

Solución

Caras trituradas de la mezcla = (0,3) (40) + (0,7) (90) = 75%

La Ecuación 5.17a se utiliza para propiedades que sean aplicables a todos los materiales áridos de todos los montones que se estén mezclando. Sin embargo, algunas propiedades solo se aplican a los áridos gruesos o a los áridos finos. Por tanto, es preciso tener en cuenta el porcentaje de áridos gruesos y finos en cada montón. La relación se expresa, en este caso, del siguiente modo:

$$X = \frac{(x_1 P_1 p_1 + x_2 P_2 p_2 + \cdots + x_n P_n p_n)}{(P_1 p_1 + P_2 p_2 + \cdots + P_n p_n)} \tag{5.17b}$$

donde,

X= el valor de prueba para la mezcla de áridos.
x_i= el resultado de la prueba para la mezcla de áridos.
P_i= el porcentaje del montón i en la mezcla.
p_i= el porcentaje del montón i que pasa por el cedazo o que es retenido por el mismo.

Problema de ejemplo 5.6

Se mezclan áridos procedentes de dos montones, A y B, que tienen angularidades de árido grueso (caras trituradas) del 40% y el 90%, respectivamente. La mezcla se lleva a cabo con una relación de 30:70 en peso. El porcentaje de material que pasa el cedazo de 4,75 mm es del 25% y el 55% para los montones A y B, respectivamente. ¿Cuál es el porcentaje de caras trituradas en la mezcla de áridos?

Solución

Caras trituradas de la mezcla =

$$X = \frac{(x_1 P_1 p_1 + x_2 P_2 p_2 + \cdots + x_n P_n p_n)}{(P_1 p_1 + P_2 p_2 + \cdots + P_n p_n)}$$

$$= \frac{(40 \times 30 \times (100 - 25) + 90 \times 70(100 - 55))}{(30 \times (100 - 25) + 70 \times (100 - 55) =} = 69\%$$

Observe que el porcentaje de árido grueso en cada pila se ha calculado restando de 100 el porcentaje de material que pasa por el cedazo de 4,75 mm.

El diseño de mezclas de hormigón asfáltico requiere que el ingeniero conozca la gravedad específica compuesta de todos los áridos de la mezcla. La gravedad específica compuesta de una mezcla de distintos áridos se obtiene aplicando la fórmula:

$$G = \frac{1}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \ldots} \tag{5.18}$$

donde

G = gravedad específica compuesta.
G_1, G_2, G_3 = gravedades específicas de las fracciones 1, 2 y 3.
P_1, P_2, P_3 = fracciones decimales según peso de los áridos 1, 2, 3 utilizados en la mezcla, siendo el total igual a 1,00.

Observe que la Ecuación 5.18 solo se utiliza para obtener la gravedad específica combinada y la densidad de la mezcla, mientras que la Ecuación 5.17 se usa para obtener otras propiedades combinadas.

Problema de ejemplo 5.7

Se mezclan áridos procedentes de tres fuentes distintas, con gravedades específicas en estado seco de 2,753, 2,649 y 2,689, respectivamente. La mezcla se realiza con una relación de 70:20:10 en peso. ¿Cuál es la gravedad específica en estado seco de la mezcla de áridos?

Solución

$$G = \frac{1}{\frac{0,7}{2,753} + \frac{0,2}{2,649} + \frac{0,1}{2,689}} = 2,725$$

5.5.9 Sustancias nocivas en los áridos

Una sustancia nociva es cualquier material que afecta adversamente a la calidad del hormigón de cemento portland o del hormigón asfáltico fabricado con el árido. La Tabla 5.10 identifica las principales sustancias nocivas de los áridos, junto con sus efectos sobre el hormigón de cemento portland. En el hormigón asfáltico, las sustancias nocivas son las masas de arcilla, las partículas blandas o desmenuzables y los recubrimientos. Estas sustancias reducen la adhesión entre el asfalto y las partículas de árido.

5.5.10 Reactividad álcali-árido

Algunos áridos reaccionan con el cemento portland dañando la estructura del hormigón. La reacción más común, especialmente en climas húmedos y cálidos, se produce entre los constituyentes activos de silicio de los áridos y los álcalis del cemento (óxido de sodio, Na_2O, y óxido de potasio, K_2O). La reacción álcali–silicio provoca una expansión excesiva, la aparición de fisuras o la formación de ampollas en el hormigón, como se muestra en la Figura 5.15. Otros constituyentes del árido, como los carbonatos, también pueden reaccionar con el álcali del cemento; sin embargo, esa reacción es menos dañina. La reacción álcali–árido se ve afectada por la cantidad, tipo y tamaño de partícula del material reactivo, así como por el contenido de álcali soluble y de agua del hormigón.

TABLA 5.10 Principales sustancias nocivas y sus efectos sobre el hormigón de cemento portland.

Sustancia	Efecto dañino
Impurezas orgánicas	Retarda el asentamiento y el endurecimiento, puede reducir el aumento de resistencia y puede causar deterioros.
Materiales de menos de 0,075 mm (Nº. 200)	Debilita las uniones, puede incrementar las necesidades de agua.
Carbón, lignita u otros materiales de baja densidad	Reduce la durabilidad, puede provocar la aparición de ampollas o manchas.
Masas de arcilla y partículas desmenuzables	Ampollas, reduce la durabilidad y la resistencia al desgaste.
Partículas blandas	Reduce la durabilidad y la resistencia al desgaste, ampollas.

La mejor forma de evaluar el potencial de la reacciones álcali–árido es revisar el histórico de comportamiento del árido en otras obras. Para los áridos de los que no se disponga de un histórico de comportamiento, existen numerosas pruebas de laboratorio que permiten verificar la reactividad potencial álcali–árido. Puede utilizarse la prueba ASTM C227 para determinar la reactividad potencialmente expansiva álcali–árido de las combinaciones de cemento y árido. En esta prueba, se almacena una barra de mortero en unas condiciones prescritas de temperatura y humedad y se determina su expansión. Puede utilizarse la prueba química rápida (ASTM C289) para identificar áridos silíceos

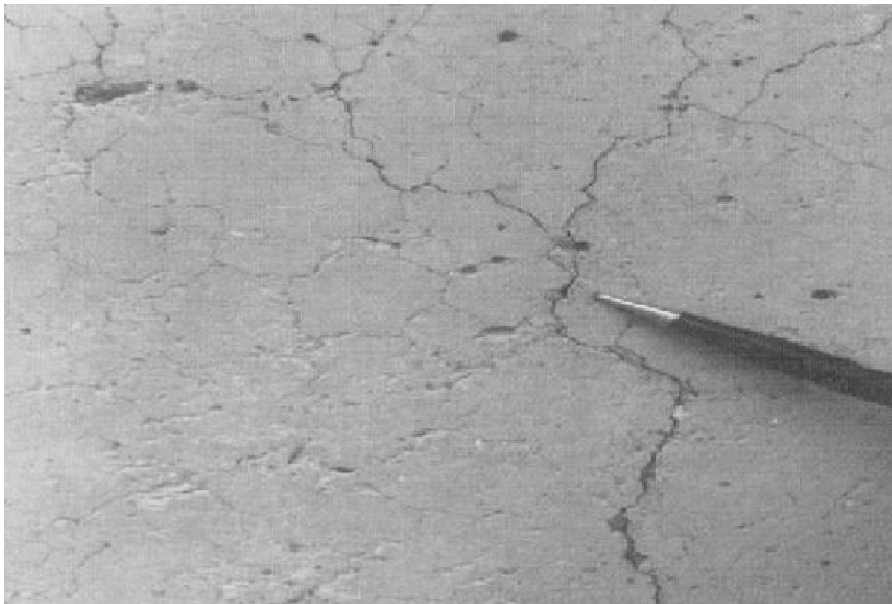


FIGURA 5.15 Ejemplo de fisuras en el hormigón debido a la reactividad álcali-silicio.

potencialmente reactivos. ASTM C586 se emplea para determinar la existencia de áridos de roca carbónica potencialmente expansiva (reactividad álcali–carbonato).

Si es necesario utilizar áridos que reaccionen con el álcali, la reactividad puede minimizarse limitando el contenido de álcali del cemento. La reactividad también puede reducirse manteniendo la estructura de hormigón lo más seca posible. Para controlar la reactividad álcali-silicio, pueden utilizarse ceniza, escorias molidas de alto horno o puzolanas naturales. También se han usado aditivos con base de litio para el mismo propósito. Finalmente, la sustitución de aproximadamente un 30% de un árido–grava reactivo por piedra caliza triturada (endulzamiento mediante piedra caliza) puede minimizar la reactividad con los álcalis (Kosmatka *et al.*, 2002).

5.5.11 Afinidad por el asfalto

La separación del asfalto, que son daños debidos a la humedad, es un fenómeno en el que la capa de asfalto se separa del árido debido a la acción del agua, reduciendo la durabilidad del hormigón asfáltico y provocando la producción de fallos en el pavimentos. Los mecanismos que provocan la separación del asfalto son complejos y no se comprenden aún completamente. Un factor importante es la afinidad relativa del árido por el agua o el asfalto. Los áridos *hidrófilos* (con afinidad por el agua), como los silicatos, tienen una mayor afinidad por el agua que por el asfalto. Suelen ser de naturaleza ácida y tienen una carga superficial negativa. Por su parte, los áridos *hidrófobos* (repelentes del agua) tienen una mayor afinidad por el asfalto que por el agua. Estos áridos, como la piedra caliza, tienen una naturaleza básica y una carga superficial positiva. Los áridos hidrófilos son más susceptibles de presentar el fenómeno de separación del asfalto que los áridos hidrófobos. Otros factores que contribuyen a que se produzca la separación del asfalto son la porosidad, la absorción, la existencia de recubrimientos y de otras sustancias nocivas.

Puesto que la separación del asfalto es el resultado de un problema de compatibilidad entre el asfalto y el árido, se realizan pruebas para determinar el potencial de separación del asfalto en una mezcla de hormigón asfáltico. En las primeras pruebas que comenzaron a llevarse a cabo, la muestra se sumergía en agua a temperatura ambiente (ASTM D1664) o en agua hirviendo (ASTM D3625); después de un periodo de tiempo, el técnico observaba el porcentaje de partículas separadas del asfalto. Otros procedimientos más recientes someten al hormigón asfáltico a ciclos de congelación–descongelación. Con estas pruebas se mide la resistencia o el módulo de las probetas y se compara con los valores de probetas no sometidas a tratamiento (ASTM D1075).

5.6 Manipulación de los áridos

Los áridos deben ser manipulados y amontonados de tal forma que se minimicen la segregación, la degradación y la contaminación. Si los áridos ruedan por la pendiente del montón, los diferentes tamaños se segregarán, depositándose las piedras de gran tama-

ño en la parte inferior y quedando las pequeñas en la parte superior. La construcción de los montones mediante capas de poco espesor permite resolver este problema. La altura desde la que se deja caer el árido debe limitarse, para evitar que las piedras se rompan, especialmente en el caso de áridos gruesos. La vibración y la agitación en una cinta transportadora tienden a hacer que las partículas más finas se depositen en el fondo, mientras que las partículas más gruesas se quedan arriba. La segregación puede minimizarse moviendo el material de la cinta frecuentemente (arriba y abajo, de lado a lado, de adelante hacia atrás), o instalando una placa deflectora, un manguito de goma o una rueda de paletas al final de la cinta, para volver a mezclar las partículas finas y gruesas. Los áridos redondeados tienden a segregarse más que los áridos triturados. Asimismo, los áridos gruesos se segregan más fácilmente que los más finos. Por tanto, los diferentes tamaños de árido deben amontonarse y transportarse por separado. Los montones deben separase mediante divisores o depositarse en contenedores para evitar las mezclas y la contaminación (Figura 5.16) (Meininger y Nichols, 1990).

5.6.1 Muestreo de áridos

Para que las pruebas descritas en este capítulo sean válidas, el muestreo del material bajo prueba debe ser representativo de la población completa de partículas que se quiera cuantificar con la prueba. Este es un problema particularmente difícil con los áridos, debido a los potenciales problemas de segregación. La muestras de áridos pueden recopilarse en cualquier fase del proceso de producción, es decir, en el montón, en las cintas transportadoras o en los compartimentos de las propias máquinas de mezcla (ASTM D75). Normalmente, el mejor lugar para llevar a cabo el muestreo es en la cinta transportadora que alimenta a los equipos de mezcla. Sin embargo, puesto que los áridos se segregan en dicha cinta, es necesario muestrear la anchura completa de la cinta en varios puntos o momentos a lo largo del proceso de producción. A continuación, las muestras deben mezclarse para que sean representativas del lote completo de material.

El muestreo en los montones deben realizarse con cuidado para minimizar la segregación. Típicamente, se toman muestras de árido de las partes superior, central e inferior del montón y luego se combinan. Antes de tomar las muestras, hay que descartar las partículas de entre 75 mm y 150 mm (3 y 6 pulgadas) presentes en la superficie. Un



FIGURA 5.16 Contenedores de áridos utilizados para amontonar los áridos de distintos tamaños.

tablero introducido verticalmente en la pila justo por encima del punto de muestreo ayuda a impedir que rueden las partículas gruesas durante la toma de muestras. Las muestras se toman utilizando una pala cuadrada y se introducen en contenedores o bolsas de muestra, que después se etiquetan.

Para muestrear montones de áridos finos se utilizan tubos de muestreo de 1,8 m (6 pies) de longitud y 30 mm (1,25 pulgadas) de diámetro. Deben tomarse al menos cinco muestras en puntos aleatorios del montón. A continuación, esas muestras deben combinarse antes de efectuar la pruebas de laboratorio.

Los tamaños de las muestras dependerán del tamaño máximo nominal de las partículas de árido (ASTM D75). Los áridos más gruesos requieren muestras de mayor tamaño para minimizar los errores de segregación. Las muestras tomadas suelen exceder con mucho las que hacen falta para las pruebas, por tanto, será necesario reducir las muestras tomadas mediante divisores de muestras (Figura 5.17) o efectuando una división en cuartos (Figura 5.18) (ASTM C702).

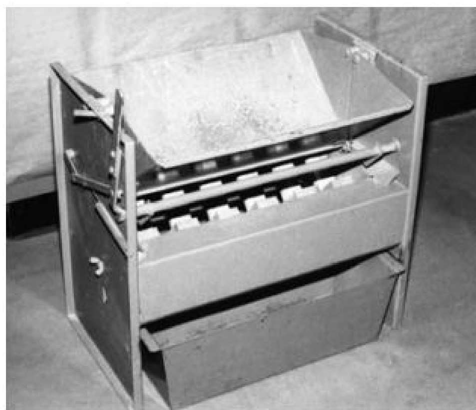


FIGURA 5.17 Divisor de muestras de áridos.

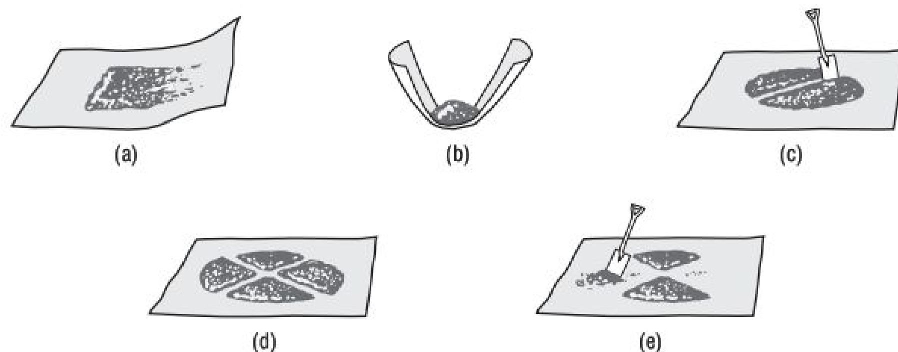


FIGURA 5.18 Pasos para reducir el tamaño de la muestra mediante división en cuartos: (a) se mezclan las partículas haciéndolas rodar sobre un paño, (b) se forma un cono después de la mezcla, (c) se aplana el cono y se divide en cuartos, (d) división en cuartos, (e) se seleccionan dos cuartos opuestos (los otros dos cuartos se descartan). (ASTM C702). Copyright ASTM. Reimpreso son su permiso.

RESUMEN

Los áridos se utilizan ampliamente como material base para los cimientos y como ingrediente del hormigón de cemento portland y del hormigón asfáltico. Aunque la clasificación geológica de los áridos permite conocer las propiedades del material, la adecuación a una fuente específica de áridos para una aplicación concreta requiere una serie de pruebas y evaluaciones. Entre los atributos más significativos de los áridos se incluyen la granulometría, la gravedad específica, la consistencia, la forma y la textura. Cuando se usan para fabricar hormigón, es necesario evaluar la compatibilidad de los áridos y del aglomerante.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

5.1 ¿Cuáles son las tres clasificaciones mineralógicas o geológicas de las rocas y cómo se forma cada uno de los tipos de roca?

5.2 Enumere cinco características deseables diferentes de los áridos empleados en el hormigón de cemento portland.

5.3 Enumere cinco características deseables diferentes de los áridos utilizados en el hormigón asfáltico.

5.4 La forma y la textura superficial de las partículas de áridos son importantes tanto en el hormigón de cemento portland (PCC) como en el asfalto de mezcla en caliente (HMA).

a. Para preparar PCC, ¿es preferible utilizar partículas de árido redondas y suaves o partículas rugosas y angulares? Explique brevemente por qué (no más de dos líneas).

b. Para preparar HMA, ¿es preferible utilizar partículas de árido redondas y suaves o partículas rugosas y angulares? Explique brevemente por qué (no más de dos líneas).

5.5 Una muestra de árido fino tiene las siguientes propiedades:

Masa húmeda = 521,0 g
Masa seca = 491,6 g
Absorción = 2,5%

Determine: (a) contenido total de humedad y (b) contenido de humedad libre.

5.6 Utilice la siguiente información para determinar el porcentaje de humedad total y libre:

Masa de arena húmeda = 627,3 g
Masa de arena seca = 590,1 g
Absorción = 1,5%

5.7 Una muestra de árido húmedo pesa 19,682 N. Después de secar la muestra en un horno, pesa 18,365 N. La absorción de este árido es del 4,8%. Calcule el porcentaje de agua libre en la muestra húmeda original.

5.8 Se llevan al laboratorio una serie de muestras de árido grueso para determinar las gravedades específicas. En las pruebas se obtienen los siguientes pesos:

Masa de la muestra de árido húmedo llevada al laboratorio: 5.298 gramos
Masa del árido secado en el horno: 5.216 g
Masa de los áridos sumergidos en agua: 3.295 g
Masa del estado SSD (saturado con superficie seca): 5.227 g

Determine:

a. La gravedad específica del árido en estado seco.
b. La gravedad específica aparente del árido.
c. El contenido de humedad del árido del montón (porcentaje).
d. La absorción (porcentaje).

5.9 Un árido grueso utilizado como base para un pavimento tiene una densidad objetivo en estado seco de 124,9 libras/pie cúbico en el lugar de instalación. Se va a disponer y compactar en un área de reparación rectangular de una calle de 1.000 pies × 52 pies × 6 pulgadas. El árido del montón contiene un 2,7% de humedad. Si el porcentaje de compactación requerido es del 95%, ¿cuántas toneladas de árido serán necesarias?

5.10. Calcule el porcentaje de huecos entre partículas de árido que han sido compactadas mediante un procedimiento de aplanado, si el peso unitario del árido aplanado es de 88,0 libras/pie^3 y la gravedad específica del árido en estado seco es de 2,701.

5.11. Se introduce árido grueso en un contenedor rígido y se aplana para obtener su peso unitario, obteniendo los siguientes datos:

Volumen del contenedor = 1/2 pie^3
Peso del contenedor vacío = 20,3 libras
Peso del contenedor lleno de árido grueso seco y aplanado = 69,6 libras

a. Calcule el peso unitario del árido seco aplanado.
b. Si la gravedad específica del árido en estado seco es de 2,620, calcule el porcentaje de huecos entre las partículas del árido.

5.12 Se realizan las siguientes pruebas de laboratorio con una muestras de áridos:

a. Medición de la gravedad específica y la absorción.
b. Medición de la consistencia.
c. Prueba de análisis granulométrico.

¿Cuál es la importancia de cada una de estas pruebas y para qué se usan?

5.13 Se realiza una prueba de medición de la gravedad específica y de la absorción (ASTM C128) en un árido fino, obteniendo los siguientes datos:

Masa de arena en estado SSD = 500,0 g
Masa del picnómetro con solo agua = 623,0 g
Masa del picnómetro con arena y agua = 938,2 g
Masa de arena seca = 495,5 g

Calcule los valores de gravedad específica (en estado seco, en estado SSD y aparente) y la absorción del árido fino.

5.14 Teniendo en cuenta la especificación ASTM C33, ¿cuál es el tamaño máximo de cedazo y el tamaño nominal máximo de cedazo para cada uno de los tamaños estándar números 4, 57, y 7.

5.15 Realice un análisis granulométrico de la siguiente muestra de árido y elabore un gráfico en un papel semilogarítmico:

Tamaño de cedazo	Cantidad retenida, g	Cantidad retenida acumulada, g	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
25 mm (1 pulg.)	0			
9,5 mm (3/8 pulg.)	35,2			
4,75 mm (Nº 4)	299,6			
2,00 mm (Nº 10)	149,7			
0,425 mm (Nº 40)	125,8			
0,075 mm (Nº200)	60,4			
Bandeja	7,3			

5.16 Realice un análisis granulométrico del siguiente árido y dibuje una gráfica de tipo potencia 0,45:

Tamaño de cedazo	Cantidad, g	Cantidad acumulada retenida, g	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
Más de 37,5 mm	0			
37,5 mm a 25 mm	206			
25 mm a 19 mm	603			
19 mm a 9,5 mm	1.413			
9,5 mm a 4,75 mm	508			
4,75 mm a 0,60 mm	963			
0,60 mm a 0,075 mm	1.425			
Bandeja	32			

5.17 Se ha realizado una prueba de análisis granulométrico en una muestra de árido y se han obtenido los siguientes resultados:

Tamaño de cedazo, mm	Cantidad retenida, g	Tamaño de cedazo, mm	Cantidad retenida, g
25	0	1,18	891,5
19	376,7	0,60	712,6
12,5	888,4	0,30	625,2
9,5	506,2	0,15	581,5
4,75	1038,4	0,075	242,9
2,36	900,1	Bandeja	44,9

Calcule el porcentaje de material que pasa a través de cada cedazo. Dibuje una gráfica del porcentaje que pasa en función del tamaño de cedazo en:

a. una gráfica semilogarítmica y en
b. una gráfica granulométrica 0,45 (Figura A.22).

5.18 Se ha realizado una prueba de análisis granulométrico en una muestra de árido grueso y se han obtenido los siguientes resultados:

Tamaño de cedazo	Cantidad retenida, libras
3 pulg.	0
2 pulg.	0
1-1/2 pulg.	5,2
1 pulg.	18,1
3/4 pulg.	14,8
1/2 pulg.	16,3
3/8 pulg.	25,0
Nº 4	8,5
Bandeja	1,6

a. Calcule el porcentaje de material que pasa a través de cada cedazo.
b. ¿Cuál es el tamaño máximo?
c. ¿Cuál es el tamaño nominal máximo?
d. Dibuje el porcentaje de material que pasa en función del tamaño de cedazo en una gráfica semilogarítmica.
e. Dibuje el porcentaje de material que pasa en función del tamaño de cedazo en una gráfica granulométrica 0,45 (Figura A.22).

f. Haciendo referencia a la especificación ASTM C33, ¿cuál es el número de tamaño más próximo? ¿Satisface los requisitos de granulometría para dicho tamaño estándar?

5.19 Dibuje una gráfica que muestre el porcentaje de material acumulado que pasa a través de cada cedazo en función del tamaño del cedazo, para áridos de granulometría correcta, de granulometría discontinua, de granulometría abierta y de tamaño homogéneo.

5.20 La Tabla P5.20 muestra las distribución de tamaños de los áridos A, B y C. Los tres áridos deben mezclarse con una relación 15:25:60 en peso, respectivamente. Utilizando un programa de hoja de cálculo, determine la distribución de tamaños de grano de la mezcla.

Tabla P5.20

	Porcentaje que pasa								
	Tamaño								
	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	1,18 mm	0,60 mm	0,30 mm	0,15 mm
Árido A	100	100	100	83	67	49	37	25	18
Árido B	100	100	74	51	32	24	19	13	7
Árido C	100	82	66	42	27	14	5	0	0

5.21 La Tabla P5.21 muestra las distribuciones de los tamaños de grano de los áridos A y B.

Tabla P5.21

Tamaño de cedazo, mm	25	19	12,5	9,5	4,750	2,36	1,18	0,600	0,300	0,150	0,075
% que pasa de árido A	100	92	76	71	53	38	32	17	10	5	3,0
% que pasa de árido B	100	100	92	65	37	31	30	29	28	21	15,4

Responda a las siguientes preguntas indicando los cálculos realizados:

a. ¿Cuáles son los tamaños máximos de los áridos A y B?
b. ¿Es el árido A de granulometría correcta? ¿Por qué?
c. ¿Es el árido B de granulometría correcta? ¿Por qué?

5.22 Hay que mezclar tres áridos con los porcentajes siguientes:

Árido A 20%
Árido B 45%
Árido C 35%

Para cada árido, la siguiente tabla muestra el porcentaje de material que pasa a través de un conjunto de cinco cedazos:

Tamaño de cedazo (mm)	% que pasa de árido A	% que pasa de árido B	% que pasa de árido C
9,5	85	50	40
4,75	70	35	30
0,6	35	20	5
0,3	25	13	1
0,15	17	7	0

Determine el porcentaje de árido mezclado que pasa cada cedazo.

5.23 La Tabla P5.23 muestra la distribución de tamaño de grano para dos áridos y los límites de especificación para un hormigón asfáltico. Determine la proporción de mezcla requerida para satisfacer la especificación y la granulometría de la mezcla. En una gráfica granulométrica semilogarítmica, dibuje las granulometrías del árido A, el árido B y de la mezcla seleccionada, e indique también los límites de especificación.

Tabla P5.23

	Porcentaje que pasa								
	Tamaño								
	19 mm (3/4 pulg.)	12,5 mm (1/2 pulg.)	9,5 mm (3/8 pulg.)	4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	0,60 mm (Nº 30)	0,30 mm (Nº 50)	0,15 mm (Nº 100)	0,075 mm (Nº 200)
Límites espc.	100	80–100	70–90	50–70	35–50	18–29	13–23	8–16	4–10
Árido A	100	85	55	20	2	0	0	0	0
Árido B	100	100	100	85	67	45	32	19	11

5.24 Se realizan pruebas de laboratorio para medir la gravedad específica y la absorción de dos áridos gruesos que se desean mezclar. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Árido A: gravedad específica en estado seco = 2,814; absorción = 0,4%
Árido B: gravedad específica en estado seco = 2,441; absorción = 5,2%

a. ¿Cuál es la gravedad específica de una mezcla del 50% del árido A y del 50% del árido B en peso?
b. ¿Cuál es la absorción de la mezcla?

5.25 El diseño de una mezcla para un hormigón asfáltico requiere que exista entre un 2 y un 6% de partículas más pequeñas que el cedazo Nº 200. Se dispone de los tres áridos siguientes:

	Inferior al Nº 200
Grueso	0,5%
Intermedio	1,5%
Fino	11,5%

Considerando que se van a utilizar cantidades aproximadamente iguales de los áridos grueso e intermedio en la mezcla, ¿cuál es el porcentaje de árido fino que permitirá obtener una cantidad de partículas de tamaño inferior a los agujeros del cedazo Nº 200 en la mezcla, que esté situado en mitad del rango, en torno al 4%?

5.26 Defina el módulo de finura de un árido. ¿Para qué se utiliza?

5.27 Calcule el módulo de finura del árido B del Problema 5.21. (Observe que el porcentaje de material que pasa por el cedazo de 1,18 mm (Nº 16) no se proporciona y será necesario estimarlo.)

5.28 Una mezcla para hormigón de cemento portland requiere arena con una granulometría que se ajuste al punto intermedio de la banda granulométrica ASTM (Tabla 5.4) y grava con una granulometría que se ajuste al punto intermedio del tamaño 467 de la banda granulométrica ASTM (Tabla 5.5), que se mezclan según un relación 2:3 en peso. En un diagrama granulométrico de potencia 0,45, dibuje las granulometrías de la arena, la grava y la mezcla. ¿Tiene la mezcla una granulometría correcta? Si no es así, ¿cómo la clasificaría?

5.29 Explique los efectos que la cantidad de material que pasa por el cedazo de 0,075 mm (Nº 200) tiene sobre la estabilidad, el drenaje y la susceptibilidad al hielo de las bases de áridos para pavimentos.

5.30 Se mezclan áridos procedentes de tres fuentes, que tienen las propiedades mostradas en la Tabla P5.30, en una relación 60:30:10 en peso. Determine las propiedades de la mezcla de áridos.

Tabla P5.30

Propiedad	Árido 1	Árido 2	Arena
Angularidad del árido grueso, porcentaje de caras trituradas	100	87	No aplicable
Gravedad específica en estado seco	2,631	2,711	2,614
Gravedad específica aparente	2,732	2,765	2,712

5.31 Se mezclan tres áridos según los siguientes porcentajes en peso:

50% Piedra caliza triturada	Gravedad específica en estado seco = 2,702
30% Escoria horno alto	Gravedad específica en estado seco = 2,331
20% Arena natural	Gravedad específica en estado seco = 2,609

¿Cuál es la la gravedad específica en estado seco de los áridos mezclados?

5.32 ¿Qué es la reactividad álcali–silicio? ¿Qué tipo de problemas provoca esa reactividad? Cite dos formas de minimizar dicha reactividad.

5.33 ¿Cuáles son las sustancias nocivas típicas de los áridos que afectan al hormigón de cemento portland? Explique sus efectos.

5.7 Referencias

Arizona Department of Transportation. *Standard Specifications for Roads and Bridge Construction*. Phoenix, AZ: Arizona Department of Transportation, 2000.

The Asphalt Institute. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*. Sexta edición. Manual Series No. 2 (MS-2). Lexington, KY: The Asphalt Institute, 1995.

Barksdale, R. D., ed. *Aggregate Handbook*. Washington, DC: National Stone Association, 1991.

Federal Highway Administration. *Asphalt Concrete Mix Design and Field Control*. Technical Advisory T 5040.27. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1988.

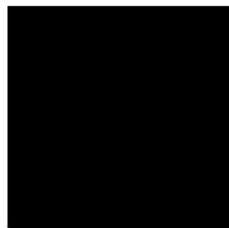
Goetz, W. H. y L. E. Wood. Bituminous Materials and Mixtures. *Highway Engineering Handbook,* Sección 18. Nueva York: McGraw-Hill, 1960.

Kosmatka, S. H., B. Kerkhoff y W. C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures*. Decimocuarta edición. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.

McGennis, R. B., et al. *Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis*. Publicación nº FHWA-SA-95-003. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1995.

Meininger, R. C. y F. P. Nichols. *Highway Materials Engineering, Aggregates and Unbound Bases*. Publicación nº FHWA-HI-90-007, NHI Course Nº 13123. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1990.

6



CEMENTO PORTLAND

El hormigón de cemento portland es el material artificial de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo.[1] Es imposible exagerar la importancia del hormigón en nuestra vida diaria. Se emplea en estructuras tales como edificios, puentes, túneles, presas, fábricas, pavimentos y campos deportivos. El hormigón de cemento portland está compuesto por cemento portland, áridos, agua, espacios rellenos de aire y, en muchos casos, aditivos. En este capítulo se tratan los temas relativos al cemento portland, a la mezcla con agua y a los aditivos. En el Capítulo 7 se describe el hormigón de cemento portland.

Existen muchos tipos de hormigón basados en distintos cementos. Sin embargo, el hormigón de cemento portland está tan extendido, que a menos que se indique lo contrario, el término hormigón siempre se refiere al hormigón de cemento portland. El cemento portland fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 y debe su nombre a los acantilados de piedra caliza de la isla de Portland, en Inglaterra (Kosmatka *et al.*, 2002).

El cemento portland es una cola instantánea (basta con añadir agua) que une las partículas de árido entre sí para formar el hormigón de cemento portland. Los especialistas en materiales que se ocupan de la selección, especificación y control de calidad de los proyectos de ingeniería civil deben conocer todo lo relativo a la producción, composición química, propiedades de hidratación y propiedades físicas del cemento portland.

6.1 Producción del cemento portland

La producción del cemento portland comienza con dos ingredientes brutos básicos: un material calcáreo y otro arcilloso. El material calcáreo es un óxido de calcio, como piedra caliza, yeso o conchas de ostras. El material arcilloso es una combinación de silicio y aluminio que puede obtenerse a partir de arcilla, esquistos y escoria de hornos altos. Como se muestra en la Figura 6.1, estos materiales se trituran y almacenan en silos. Los materiales en bruto, en las proporciones deseadas, pasan a través de una moledora, utilizán-

Los cementos en España están regulados por la Instrucción para la Recepción de cementos, RC-08 y las normas UNE, concordantes con la norma europea EN 197.

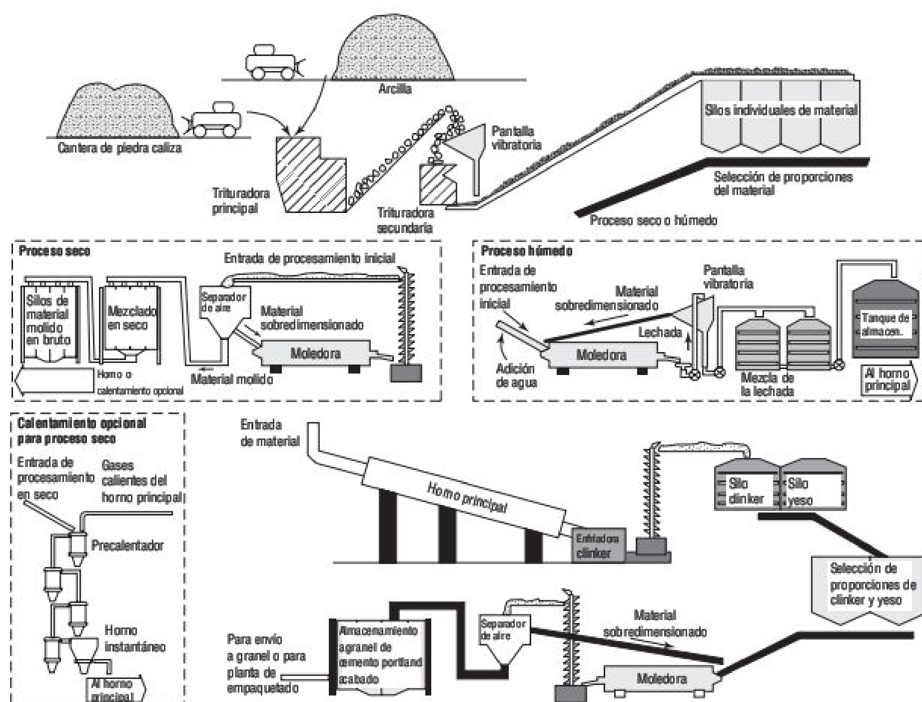


FIGURA 6.1 Pasos en la fabricación del cemento portland.

dose un proceso de fabricación húmedo o seco. El material molido se almacena hasta que puede enviarse al horno principal. Las cementeras modernas que utilizan un proceso seco emplean un ciclo de recuperación de calor para precalentar el material molido, mediante el gas de salida del horno principal. Además, algunas cementeras usan un horno instantáneo para calentar aún más los materiales. Tanto el precalentador como el horno instantáneo mejoran la eficiencia energética de la producción de cemento. En el horno principal, los materiales en bruto se funden a temperaturas de entre 1400°C y 1650°C (2500°F y 3000°F), lo que hace que estos materiales se transformen en *clinker* de cemento. El clinker se enfría a continuación y se almacena. El proceso final implica moler el clinker para obtener un polvo fino. Durante el molido, se añade una pequeña cantidad de yeso para regular el tiempo de fraguado del cemento en el hormigón.

El producto acabado puede almacenarse y transportarse a granel o en sacos. En Estados Unidos, un *saco* estándar de cemento contiene 94 libras, lo que es aproximadamente igual a 1 pie^3 de cemento suelto recién empaquetado. El cemento se puede almacenar durante largos periodos de tiempo, siempre y cuando se mantenga seco.

6.2 Composición química del cemento portland

Los materiales en bruto utilizados para fabricar el cemento portland son la cal, la sílice, el óxido de aluminio y el óxido de hierro. Estos materiales en bruto interactúan en

TABLA 6.1 Compuestos principales del cemento portland.

Compuesto	Fórmula química	Fórmula común*	Rango usual en peso (%)
Silicato tricálcico	$3\ CaO \cdot SiO_2$	C_3S	45–60
Silicato dicálcico	$2\ CaO\ .\ SiO_2$	C_2S	15–30
Aluminato tricálcico	$3\ CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	6–12
Aluminoferrita tetracálcica	$4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	6–8

* La industria cementera suele utilizar una notación abreviada para las fórmulas químicas: C =óxido de calcio, S = dióxido de silicio, A = óxido de aluminio y F = óxido de hierro.

el horno principal formando compuestos químicos complejos. La *calcinación* en el horno reestructura la composición molecular, produciendo cuatro compuestos principales, que se muestran en la Tabla 6.1.

C_3S y C_2S al hidratarse, proporcionan las características deseadas al hormigón. El óxido de aluminio y el hierro, que producen C_3A y C_4AF, se incluyen con los otros materiales en bruto para reducir la temperatura requerida para generar C_3S; esa temperatura se reduce de 2000°C a 1350°C (3500°F a 2500°F). Esto permite ahorrar energía y reduce el coste de producción del cemento portland.

Además de estos compuestos principales, existen otros compuestos menores, como el óxido de magnesio, el óxido de titanio, el óxido de manganeso, el óxido de sodio y el óxido de potasio. Estos compuestos menores representan un porcentaje pequeño del peso del cemento, pero el término “compuestos menores” hace referencia a su cantidad y no a su importancia. De hecho, dos de los compuestos menores, el óxido de sodio (Na_2O) y el óxido de potasio (K_2O) se conocen con el nombre de álcalis. Estos álcalis reaccionan con algunos áridos provocando la desintegración del hormigón y afectando a la velocidad de desarrollo de la resistencia, como se explica en el Capítulo 5.

6.3 Finura del cemento portland

La finura de las partículas de cemento es una propiedad importante que hay que controlar cuidadosamente. Puesto que la hidratación comienza en la superficie de las partículas de cemento, cuantos más finas sean éstas, mayor será el área superficial y más rápido se producirá la hidratación. Por tanto, la utilización de un material más fino tiene como resultado un desarrollo más rápido de la resistencia y un calor inicial de hidratación mayor. Incrementar la finura más allá de lo necesario para un cierto tipo de cemento incrementa los costes de producción y puede ser perjudicial para la calidad del hormigón.



FIGURA 6.2 Aparato de Blaine para medida de la permeabilidad al aire.

El tamaño máximo de las partículas de cemento es de 0,09 mm (0,0035 pulg.); entre el 85% y el 95% de las partículas son menores de 0,045 mm (0,0018 pulg.) y el diámetro medio es de 0,01 mm (0,0004 pulg.). (Como referencia, un cedazo del número 200 permite pasar todas las partículas que sean más pequeñas de 0,075 mm.) Un kilogramo de cemento portland contiene aproximadamente 7 billones de partículas, con un área superficial total de entre 300 m^2 a 400 m^2 (1500 $pies^2$ a 2000 $pies^2$ por libra). El área superficial total por unidad de peso está en función del tamaño de las partículas y puede medirse más fácilmente. Por tanto, la especificación del tamaño de las partículas se define en función del área superficial por unidad de peso.

Normalmente, la finura del cemento se mide de forma indirecta, midiendo el área superficial con el aparato de medición de la permeabilidad al aire de Blaine (ASTM C204) o mediante el turbidímetro de Wagner (ASTM C115). En la prueba de Blaine (Figura 6.2), se determina el área superficial de las partículas de cemento, en cm^2/g, midiendo la permeabilidad al aire de una muestra de cemento y relacionándola con la permeabilidad al aire de un material estándar. El turbidímetro de Wagner determina el área superficial midiendo la velocidad de sedimentación del cemento suspendido en queroseno. Cuanto más finas sean las partículas de cemento, más lenta será la sedimentación. Tanto la prueba de Blaine como la de Wagner son medidas indirectas del área superficial y utilizan principios de medida ligeramente distintos. Por tanto, las pruebas realizadas con una misma muestra de cemento darán resultados diferentes. La finura también puede medirse determinando el porcentaje de partículas que pasan el cedazo de 0,045 mm (Nº 325) (ASTM C430).

6.4 Gravedad específica del cemento portland

La gravedad específica del cemento hace falta para calcular las proporciones de las mezclas. La gravedad específica del cemento portland (sin tener en cuenta los huecos existentes entre las partículas) es de aproximadamente 3,15 y puede determinarse de acuerdo con la norma ASTM C188. La densidad del cemento a granel (incluyendo los

huecos entre las partículas) varía considerablemente, dependiendo de cómo se maneje y almacene el cemento. Por ejemplo, la vibración durante el transporte del cemento a granel hace que el cemento se consolide e incremente su densidad. Es por eso que las magnitudes relativas al cemento se miden según el peso en lugar de según el volumen.

6.5 Hidratación del cemento portland

La hidratación es la reacción química entre las partículas de cemento y el agua. Las magnitudes que permiten caracterizar esta reacción son el cambio en la naturaleza molecular de los materiales, el nivel de energía y la velocidad de reacción. En la Tabla 6.2 se muestran las principales reacciones químicas. Puesto que el cemento portland está formado por varios compuestos, se producen simultáneamente varias reacciones.

El proceso de hidratación tiene lugar a través de dos mecanismos: el mecanismo de solución y el topoquímico. El mecanismo de solución se desarrolla en los siguientes pasos (Mehta y Monteiro, 1993):

1. Disolución de los compuestos anhidros en sus constituyentes.
2. Formación de hidratos en solución.
3. Precipitación de los hidratos a partir de la solución sobresaturada.

El mecanismo de solución domina las etapas iniciales de la hidratación. La hidratación topoquímica es una reacción química de estado sólido que se produce en la superficie de las partículas de cemento.

Los aluminatos se hidratan mucho más rápido que los silicatos. La reacción del aluminato tricálcico con el agua es inmediata y libera grandes cantidades de calor. Se utiliza el yeso para ralentizar la velocidad de hidratación del aluminato. El yeso se disuelve rápidamente, generando iones sulfato que bloquean la solubilidad de los aluminatos. La relación entre aluminatos y sulfatos determina la velocidad de *fraguado* (solidificación). La pasta de cemento que se fragua a velocidad normal requiere bajas concentraciones tanto de iones aluminato como de iones sulfato. La pasta de cemento seguirá siendo trabajable durante unos 45 minutos; a partir de ahí, comenzará a volverse rígida, a medida que los cristales desplacen al agua en los poros. La pasta comienza a solidificarse entre dos y cuatro horas después de añadir el agua al cemento. Si hay un exceso tanto de iones aluminato como de iones sulfato, puede que la etapa en la que el cemento puede trabajarse dure solo 10 minutos y el fraguado puede tardar entre una y dos horas. Si la disponibilidad de iones aluminato es alta y la de iones sulfato es baja, puede producirse un *fraguado rápido* (10 a 45 minutos) o un *fraguado instantáneo* (menos de 10 minutos). Por último, si la disponibilidad de iones aluminato es baja y la de los iones sulfato es alta, el yeso puede volver a cristalizarse en los poros en 10 minutos, dando lugar a un fraguado instantáneo. El fraguado instantáneo provoca una gran liberación de calor y tiene como resultado una disminución de la resistencia máxima (Mehta y Monteiro, 1993).

TABLA 6.2 Reacciones químicas principales durante la hidratación del cemento.

2 (3 $CaO \cdot SiO_2$)	+	6 H_2O			=	3 $CaO \cdot 2\ SiO_2 \cdot 3\ H_2O$	+	3 $Ca\ (OH)_2$
Silicato tricálcico		Agua				Silicato de calcio hidratado		Hidróxido de calcio
2 (2 $CaO \cdot SiO_2$)	+	4 H_2O			=	3 $CaO \cdot 2\ SiO_2 \cdot 3\ H_2O$	+	$Ca\ (OH)_2$
Silicato dicálcico		Agua				Silicato de calcio hidratado		Hidróxido de calcio
3 $CaO \cdot Al_2O_3$	+	12 H_2O	+	$Ca\ (OH)_2$	=	3 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca\ (OH)_2 \cdot 12\ H_2O$		
Aluminato tricálcico		Agua		Hidróxido de calcio		Aluminato de calcio hidratado		
4 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	+	10 H_2O	+	2 $Ca\ (OH)_2$	=	6 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12\ H_2O$		
Aluminoferrita tetracálcica		Agua		Hidróxido de calcio		Aluminoferrita cálcica hidratada		
3 $CaO \cdot Al_2O_3$	+	10 H_2O	+	$CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$	=	3 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$		
Aluminato tricálcico		Agua		Yeso		Monosulfoaluminato cálcico hidratado		

Los silicatos de calcio se combinan con agua para formar silicatos de calcio hidratado, C-S-H. Los cristales comienzan a formarse unas pocas horas después de mezclar el agua y el cemento, y se pueden desarrollar de manera continua mientras queden partículas de cemento sin reaccionar y agua libre. El C-S-H no es un compuesto bien definido. La relación calcio-silicato varía entre 1,5 y 2,0, y el contenido de agua estructuralmente combinada es todavía más variable.

Como se muestra en la Tabla 6.2, el proceso de hidratación de los silicatos genera tanto C-S-H como hidróxido de calcio. La hidratación completa del C_3S produce un 61% de C-S-H y un 39% de hidróxido de calcio; la hidratación del C_2S da lugar a un 82% de C-S-H y un 18% de hidróxido de calcio. Puesto que el C-S-H es lo que hace que la pasta de cemento hidratada sea resistente, la resistencia máxima del hormigón aumenta si se incrementa el contenido de C_2S en relación con la cantidad de C_3S Además, el hidróxido de calcio es susceptible de ser atacado por los sulfatos y las aguas ácidas. Al incrementar la proporción de C_2S en relación con la de C_3S, se reduce la cantidad de hidróxido de calcio y se aumenta la durabilidad del hormigón.

El C_3S se hidrata más rápidamente que el C_2S, contribuyendo al tiempo de fraguado final y a la ganancia de resistencia inicial de la pasta de cemento. La velocidad de hidratación se acelera si existen iones sulfato en solución. Por tanto, un efecto secundario de la adición de yeso al cemento consiste en incrementar la velocidad de generación del C-S-H.

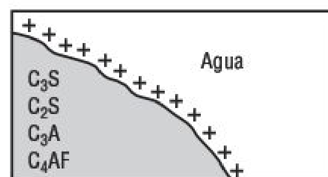
6.5.1 Desarrollo de la estructura en la pasta de cemento

La Figura 6.3 resume el desarrollo secuencial de la estructura en una pasta de cemento. El proceso comienza inmediatamente después de añadir agua al cemento [Figura 6.3(a)]. En menos de 10 minutos, el agua se vuelve altamente alcalina. A medida que se hidratan las partículas de cemento, el volumen de esas partículas se reduce, incrementando el espacio entre las mismas. Durante las etapas iniciales de la hidratación, pueden formarse enlaces débiles, particularmente a partir del C_3A hidratado [Figura 6.3(b)]. La hidratación ulterior hace que la mezcla se vuelva más rígida y comienza a bloquear la estructura del material [Figura 6.3(c)]. El fraguado final se produce cuando la fase C-S-H ha desarrollado una estructura rígida, quedando todos los componentes de la pasta en su lugar e incrementándose el espaciado entre los gránulos, a medida que estos se consumen por hidratación, [Figura 6.3(d)]. La pasta de cemento continúa endureciéndose y gana resistencia según va progresando la hidratación [Figura 6.3(e)]. El endurecimiento se produce rápidamente en las primeras etapas y continúa teniendo lugar mientras queden partículas de cemento no hidratadas y exista agua libre. Sin embargo, la velocidad de endurecimiento disminuye con el tiempo.

6.5.2 Evaluación del progreso de la hidratación

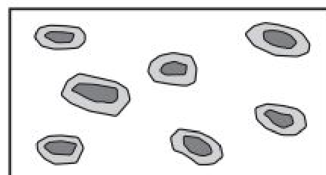
Existen varios métodos para evaluar el progreso de la hidratación del cemento en el hormigón endurecido. Entre estos métodos se incluyen la medida de las siguientes propiedades (Neville, 1981):

La fase C-S-H es la primera. El C_3A forma un gel más rápido.



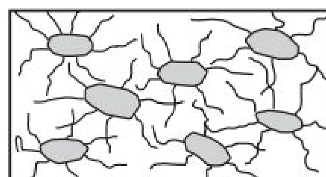
(a)

El volumen de los gránulos de cemento se reduce a medida que se forma un gel en su superficie. Los gránulos del cemento siguen siendo capaces de moverse independientemente, pero a medida que la hidratación progresa, comienzan a aparecer enlaces débiles. Parte del cemento se encuentra en un estado tixotrópico; la vibración puede hacer que esos enlaces débiles se rompan.



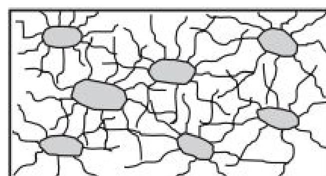
(b)

El fraguado inicial se produce con el desarrollo de un esqueleto débil, que hace que los gránulos de cemento se mantengan en su sitio.



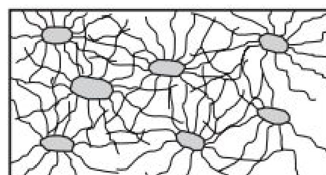
(c)

El fraguado final tiene lugar a medida que el esqueleto se vuelve rígido, lo que hace que las partículas de cemento queden fijadas y que el espaciado entre los gránulos de cemento se incremente, debido a la reducción del volumen de los gránulos.



(d)

Los espacios entre los gránulos de cemento se rellenan con con productos de la hidratación, a medida que la pasta de cemento va desarrollando su resistencia y durabilidad.



(e)

FIGURA 6.3 Desarrollo de la estructura de la pasta de cemento: (a) fase C-S-H inicial, (b) formación de gel, (c) fraguado inicial-desarrollo de un esqueleto débil, (d) fraguado final-desarrollo de un esqueleto rígido, (e) endurecimiento (Hover y Phillco, 1990).

1. El calor de hidratación.
2. La cantidad de hidróxido de calcio que se desarrolla en la pasta debido a la hidratación.
3. La gravedad específica de la pasta.
4. La cantidad de agua combinada químicamente.
5. La cantidad de pasta de cemento no hidratada, que puede determinarse utilizando un análisis cuantitativo mediante rayos X.
6. La resistencia de la pasta hidratada, lo que constituye una medida indirecta.

6.6 Huecos en el cemento hidratado

Debido al crecimiento aleatorio de los cristales y a los distintos tipos de cristales, a medida que el cemento se hidrata, se forman huecos en la estructura de la pasta. La resistencia, la durabilidad y la estabilidad volumétrica del hormigón se ven afectadas en gran medida por estos huecos. Durante la hidratación se forman dos tipos de huecos: espacios de hidratación intercapas y los huecos capilares.

El *espacio de hidratación intercapas* es el existente entre las capas del C-S-H. El espesor de esos espacios está entre 0,5 nm y 2,5 nm, lo que es demasiado pequeño para afectar a la resistencia. Sin embargo, puede contribuir hasta un 28% a la porosidad de la pasta. El agua en el espacio interpartículas está atrapada firmemente por enlaces de hidrógeno, pero puede eliminarse cuando la humedad sea inferior al 11%, provocando una contracción considerable.

Los *huecos capilares* son la consecuencia de que la pasta de cemento hidratada tenga una gravedad específica menor que las partículas de cemento. La cantidad y el tamaño de los huecos capilares depende de la separación inicial de las partículas de cemento, que a su vez está controlada por la proporción de agua en la pasta de cemento. Para una pasta de cemento altamente hidratada en la que se haya usado una cantidad mínima de agua, los huecos capilares tendrán un tamaño de entre 10 nm y 50 nm. Un cemento poco hidratado, producido con un exceso de agua, puede tener huecos capilares de entre 3 mm y 5 mm. Los huecos capilares mayores que 50 nm reducen la resistencia e incrementan la permeabilidad. La eliminación del agua de los huecos capilares superiores a 50 nm no provoca una contracción, mientras que la eliminación de agua de los huecos más pequeños sí que da lugar a contracción.

Además del espacio intercapas y de los huecos capilares, durante la mezcla puede verse atrapada en la pasta de cemento una cierta cantidad de aire. El *aire atrapado* reduce la resistencia e incrementa la permeabilidad. Sin embargo, la existencia de microscópicas burbujas de aire bien distribuidas puede aumentar enormemente la durabilidad de la pasta de cemento. Es por eso que, como se describe posteriormente en el capítulo, se utilizan ampliamente aditivos para *airear* la pasta de cemento, con el fin de retener aire en su interior.

6.7 Propiedades del cemento hidratado

La adecuada hidratación del cemento portland es uno de los problemas fundamentales de control de calidad para los fabricantes. Aunque existen una serie de especificaciones que controlan la calidad del cemento portland, estas no garantizan la calidad del hormigón hecho con ese cemento. El diseño de la mezcla, el control de calidad y las características de los áridos y del agua empleados para la mezcla también influyen en la

calidad del hormigón. Las propiedades del cemento hidratado se evalúan empleando *pasta de cemento* (agua y cemento) o *mortero* (pasta y arena).

6.7.1 Fraguado

El fraguado hace referencia al endurecimiento de la pasta de cemento o al cambio de estado plástico a estado sólido. Aunque el fraguado dota al cemento de una cierta resistencia, es preciso distinguirlo del *endurecimiento,* que hace referencia a la ganancia de resistencia en una pasta de cemento fraguada. El fraguado normalmente se describe en dos niveles: fraguado inicial y fraguado final. La definición de los fraguados inicial y final es arbitraria, y se basa en medidas realizadas con el aparato de Vicat (ASTM C191) o las agujas de Gillmore (ASTM C266).

La prueba de Vicat (Figura 6.4) requiere que se prepare una muestra de pasta de cemento, utilizando la cantidad de agua requerida para una consistencia normal y de acuerdo con un procedimiento especificado. Se permite a la aguja de 1 mm (0,04 pulgadas) de diámetro penetrar en la pasta durante 30 segundos y se mide la profundidad de penetración. Ese proceso de penetración se repite cada 15 minutos (cada 10 minutos para el cemento de Tipo III), hasta que se obtiene una penetración de 25 mm (1 pulgada) o inferior. Por interpolación, se determina el instante en que tiene lugar una penetración de 25 mm y se anota como tiempo de fraguado inicial. El tiempo de fraguado final corresponderá al momento en que la aguja no pueda penetrar de manera visible en la pasta.

De forma similar a la prueba de Vicat, la prueba de Gillmore (Figura 6.5) requiere que se prepare una muestra de pasta de cemento de consistencia normal. Se moldea una pella con una parte superior plana y se aplica ligeramente a su superficie la aguja de Gillmore para medir el tiempo de fraguado inicial. El proceso de aplicación de la aguja se repite hasta que la pella resista la fuerza de la aguja sin que se produzca una

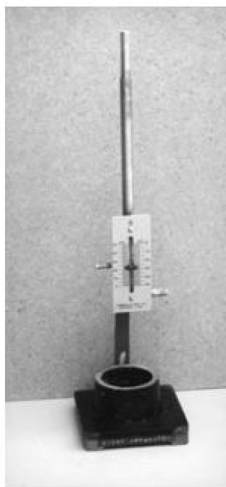


FIGURA 6.4 Aparato de Vicat para medida del tiempo de fraguado.

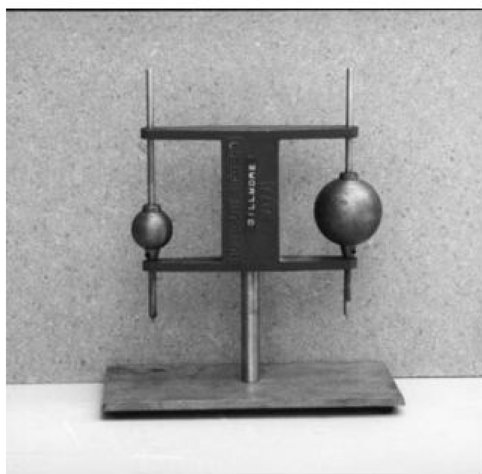


FIGURA 6.5 Aparato de Gillmore para medida del tiempo de fraguado.

indentación apreciable, anotándose entonces el tiempo transcurrido como tiempo inicial de fraguado. Este proceso se repite a continuación con la aguja de Gillmore para determinar el tiempo de fraguado final, anotándose también dicho tiempo. Debido a las diferencias en los procedimientos y en los aparatos de prueba, las pruebas de Vicat y Gillmore dan resultados diferentes para una misma muestra de material.

El tiempo de fraguado inicial debe permitir manejar y colocar el hormigón antes de que frague la mezcla. El tiempo de fraguado final máximo se especifica y se mide para garantizar una hidratación normal. Durante la fabricación del cemento, se añade yeso para regular el tiempo de fraguado. Otros factores que afectan al tiempo de fraguado son la finura del cemento, la relación agua–cemento y el uso de aditivos.

Si el cemento queda expuesto a la humedad durante el almacenamiento, podría producirse un *falso fraguado* que hace que el cemento se endurezca en unos pocos minutos después de la mezcla, sin liberar mucho calor. Para resolver este problema, puede volver a mezclarse vigorosamente la pasta de cemento, sin añadir agua, para restaurar la plasticidad de la pasta y permitir que frague de forma normal, sin perder resistencia. Un falso fraguado no es lo mismo que el fraguado rápido o el fraguado instantáneo mencionados anteriormente; un falso fraguado puede remediarse volviendo a mezclar la pasta, mientras que los fraguados rápido e instantáneo no pueden corregirse.

6.7.2 Consistencia

La consistencia de la pasta de cemento hace referencia a su capacidad de mantener su volumen una vez que ha fraguado. Si el cemento no es consistente, podría producirse una expansión después del fraguado, provocada por una hidratación retardada o lenta o por otras reacciones. Se utiliza la prueba de expansión en autoclave (Figura 6.6) (ASTM C151) para comprobar la consistencia de la pasta de cemento. En esta prueba, se someten a calor y a una alta presión a una serie de barras de pasta de cemento y se



FIGURA 6.6 Aparato de expansión en autoclave para cemento.

mide el grado de expansión. La norma ASTM C150 limita la expansión en autoclave a un 0,8%.

6.7.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del mortero se mide preparando cubos de 50 mm (2 pulgadas) y sometiéndolos a compresión de acuerdo con la norma ASTM C109. El mortero se prepara con cemento, agua y arena normal (ASTM C778). La norma ASTM C150 especifica los valores mínimos de resistencia a la compresión para diferentes tipos de cemento de distinta edad. La resistencia a la compresión de los cubos de mortero es proporcional a la resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón. Sin embargo, no puede predecirse de forma precisa la resistencia a la compresión del hormigón a partir de la resistencia de los cubos de mortero, ya que la resistencia del hormigón también se ve afectada por las características de los áridos, la mezcla utilizada para fabricar el hormigón y los procedimientos de construcción.

6.8 Relación agua–materiales cementosos

En 1918, Abrams descubrió que la relación entre el peso de agua y el peso del cemento, *relación agua–cemento,* influye sobre todas las características deseables del hormi-

gón. Para un hormigón completamente compactado, fabricado con áridos consistentes y limpios, se puede mejorar la resistencia y otras propiedades deseables, reduciendo el peso de agua utilizado por unidad de peso de cemento. Este concepto se suele denominar frecuentemente ley de Abrams.

En los últimos años, se han utilizado materiales cementosos suplementarios, como la ceniza en polvo, la escoria, el humo de sílice y las puzolanas naturales, como aditivos para alterar algunas de las propiedades del hormigón de cemento portland. Es por esto que el término "relación agua–cemento" se ha ampliado, utilizándose la *relación agua– materiales cementosos* para incluir estos otros materiales cementosos.

La hidratación requiere aproximadamente entre 0,22 kg y 0,25 kg de agua por 1 kg de cemento. Generalmente, las mezclas de hormigón necesitan un exceso de humedad, más allá de las necesidades de hidratación para facilitar que se pueda trabajar con el hormigón. El exceso de agua provoca la aparición de huecos capilares en el hormigón. Estos huecos incrementan la porosidad y la permeabilidad del hormigón y reducen la resistencia. La Figura 6.7 muestra una dependencia típica entre la relación agua–materiales cementosos y la resistencia a la compresión. Es fácil comprobar que al incrementar la relación agua–materiales cementosos se reduce la resistencia a la compresión del hormigón para diversos tiempos de curación. Una baja relación agua–materiales cementosos también incrementa la resistencia a la meteorización, proporciona un buen enlace entre las capas sucesivas de hormigón, y entre el hormigón y la armadura de acero, y limita los cambios de volumen debidos a la humidificación y el secado. El hormigón aireado incluye un agente de aireación, un aditivo, que se emplea

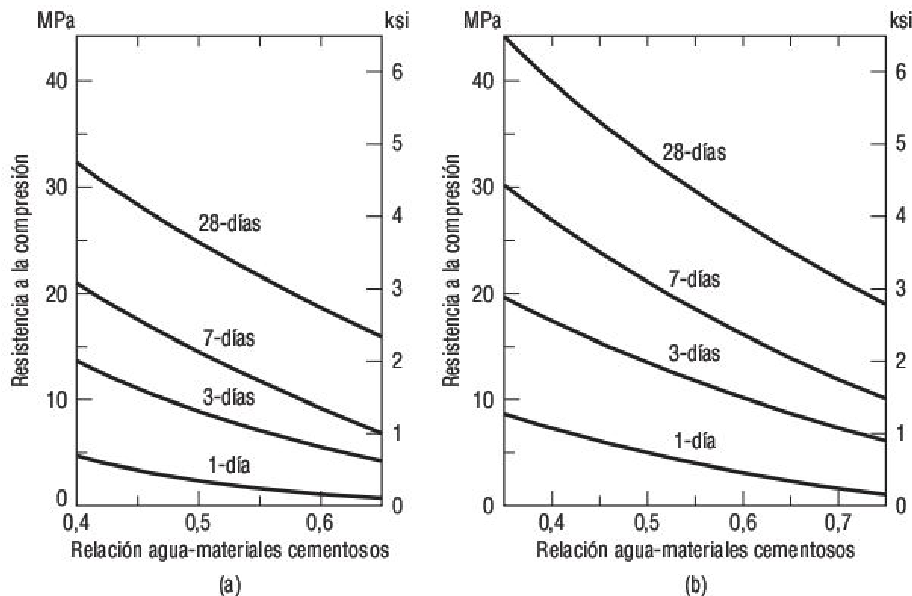


FIGURA 6.7 Relaciones típicas edad-resistencia del hormigón basadas en pruebas de compresión de cilindros de 0,15 x 0,30 m (6 x 12 pulgadas), utilizando cemento portland Tipo I y una curación a 21°C (70°F): (a) hormigón aireado, (b) hormigón no aireado (Kosmatka *et al.*, 1988).

para incrementar la resistencia del hormigón a la congelación y la descongelación, como veremos más adelante en el capítulo. La curación mantiene un adecuado contenido de humedad y una adecuada temperatura en el hormigón endurecido durante un determinado periodo de tiempo, para permitir la hidratación (véase el Capítulo 7).

6.9 Tipos de cemento portland

Las diferentes aplicaciones del hormigón requieren que se empleen cementos con distintas propiedades. Algunas aplicaciones requieren una rápida ganancia de resistencia para acelerar el proceso de construcción. Otras aplicaciones precisan un bajo calor de hidratación, para controlar los cambios de volumen y las grietas de contracción asociadas. En algunos casos, el hormigón está expuesto a los sulfatos (SO_4), que pueden deteriorar el hormigón de cemento portland. Afortunadamente, estas situaciones pueden encararse variando los materiales en bruto empleados para producir el cemento y alterando así las relaciones de los cuatro compuestos principales del cemento portland enumerados en la Tabla 6.1. La velocidad de hidratación también puede modificarse variando la finura del cemento producido en la moledora final. El cemento se clasifica en cinco tipos estándar ademas de en otros tipos especiales.

6.9.1 Tipos estándar de cemento portland

La Tabla 6.3 describe los cincos tipos estándar de cemento portland (Tipos I a V) especificados en la norma ASTM C150. Además de estos cinco tipos, pueden añadirse agentes de aireación a los cementos de Tipo I, II y III durante la fabricación, obteniendo los Tipos IA, IIA y IIIA, que presentan una mejor resistencia a la congelación y a la descongelación que los cementos no aireados. El uso de cementos aireados (Tipos IA, IIA y IIIA) ha disminuido debido a la mayor disponibilidad y a la más alta fiabilidad de los aditivos aireadores que pueden incluirse durante la mezcla del hormigón. El uso y los efectos de los aireadores se describirán en la sección dedicada a los aditivos. En la Tabla 6.4 se detallan las especificaciones ASTM para los tipos de cemento estándar.

La Tabla 6.5 detalla los porcentajes máximos admitidos de los compuestos, junto con el valor requerido de finura de Blaine (que controla el tamaño de las partículas). Observe que las composiciones químicas de los cementos de Tipo I y III son casi idénticas; la diferencia principal es el área superficial mucho mayor del cemento Tipo III. El contenido de C_3A de los cementos de Tipo II y V es inferior al del Tipo I, lo que mejora la resistencia a los sulfatos. El C_3S y el C_3A están limitados en el cemento de Tipo IV, con el fin de limitar la velocidad de hidratación.

La existencia de una especificación ASTM para un tipo de cemento no garantiza que dicho cemento esté disponible. El cemento de Tipo I está ampliamente disponible y representa la mayor parte de la producción de cemento en Estados Unidos. El segundo

tipo más comúnmente disponible es el de Tipo II. Pueden fabricarse cementos que satisfagan todos los requisitos de los Tipos I y II; estos cementos se designan con el nombre de Tipo I/II. El cemento de Tipo III representa aproximadamente un 4% de la producción de Estados Unidos. Debido a los requisitos de molido más estrictos del Tipo III, este cemento es más caro que el de Tipo I. La ganancia de resistencia del cemento de Tipo I puede acelerarse incrementando el contenido de cemento por unidad de volumen de hormigón, de modo que la selección de cemento de Tipo III se convierte en una cuestión de economía y disponibilidad. El cemento de Tipo IV puede fabricarse bajo pedido. Como veremos posteriormente, la adición de ceniza en polvo a los cementos portland de Tipo I o II reduce el calor de hidratación, obteniéndose los beneficios del cemento de Tipo IV, pero con un coste inferior. El cemento de Tipo V solo se fabrica en lugares donde existe un grave problema con los sulfatos.

TABLA 6.3 Tipos y aplicaciones del cemento portland estándar.

Tipo	Nombre	Aplicación
I	Normal	Trabajo general con hormigón cuando no sean necesarias las propiedades de los otros tipos. Adecuado para suelos, estructuras de hormigón reforzado, pavimentos, etc.
II	Resistencia moderada a los sulfatos	Protección frente a una exposición moderada a los sulfatos, de 0,1–0,2% de peso de sulfatos solubles en agua en suelos o 150–1.500 ppm de sulfato en agua (agua marina). Puede especificarse con un calor moderado de hidratación, lo que le hace adecuado para grandes muelles, grandes contrafuertes y muros de contención. El moderado calor de hidratación también es ventajoso a la hora de colocar el hormigón en regiones cálidas.
III	Alta resistencia inicial	Utilizado para la construcción rápida cuando es necesario eliminar los encofrados lo más deprisa posible, o cuando haya que poner en servicio la estructura lo antes posible. En ambientes fríos reduce el tiempo requerido para una curación controlada.
IV	Bajo calor de hidratación	Se utiliza cuando la masa de la estructura, como en el caso de las presas de gran tamaño, requiera un control cuidadoso del calor de hidratación.
V	Alta resistencia a los sulfatos	Protección frente a una exposición severa a sulfatos, de entre 0,2–2,0% de peso de sulfatos solubles en agua para suelos, o de 1500–10,800 ppm de sulfatos en agua.

TABLA 6.4 Propiedades estándar del cemento portland (ASTM C150) (Copyright ASTM, reimpreso con su permiso).

Tipo de cemento	I	IA	II	IIA	III	IIIA	IV	V
Contenido de aire del mortero[A], volumen %								
máximo	12	22	12	22	12	22	12	12
mínimo	—	16	—	16	—	16	—	—
Finura[B], superficie específica, m^2/kg (métodos alternativos)								
Prueba de turbidímetro, mín.	160	160	160	160	—	—	160	160
Prueba de permeabilidad al aire, mín.	280	280	280	280	—	—	280	280
Expansión en autoclave, máx., %	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Resistencia mínima a la compresión, psi (MPa)[C]								
1 día	—	—	—	—	1800	1450	—	—
	—	—	—	—	(12,4)	(10,0)	—	—
3 días	1800	1450	1500	1200	3500	2800	—	1200
	(12,4)	(15,5)	(10,3)	(8,3)	(24,1)	(19,3)	—	(8,3)
			1000[D]	800[D]				
			(6,9)[D]	(5,5)[D]				
7 días	2800	2250	2500	2000	—	—	1000	2200
	(19,3)	(15,5)	(17,2)	(13,8)	—	—	(6,9)	(15,2)
			1700[D]	1350[D]				
			(11,7)[D]	(9,3)[D]				
28 días	—	—	—	—	—	—	2500	3000
	—	—	—	—	—	—	(17,2)	(20,7)
Tiempo de fraguado (métodos alternativos):[E]								
Prueba de Gillmore:								
Fraguado inicial, minutos, no menos de	60	60	60	60	60	60	60	60
Fraguado final, minutos, no más de	600	600	600	600	600	600	600	600
Prueba de Vicat:								
Fraguado inicial, minutos, no menos de	45	45	45	45	45	45	45	45
Fraguado inicial, minutos, no más de	375	375	375	375	375	375	375	375

[A] El cumplimiento con los requisitos de esta especificación no garantiza necesariamente que se contendrá el contenido de aire necesario en el hormigón.
[B] Puede utilizarse cualquiera de los dos métodos alternativos de medida de la finura, al arbitrio del laboratorio de pruebas. Sin embargo, si la muestra no cumple los requisitos de la prueba de permeabilidad al aire, habrá que utilizar la prueba del turbidímetro y los requisitos de esta tabla aplicables a dicho método.
[C] La resistencia a cualquier edad especificada no debe ser inferior a la obtenida a ninguna edad especificada anterior.
[D] Cuando se especifique el calor opcional de hidratación o el límite químico relativo a la suma del silicato tricálcico y del aluminato tricálcico.
[E] El comprador debe especificar el tipo de prueba de tiempo de fraguado requerida. Si no lo especifica, solo se aplicarán los requisitos relativos a la prueba de Vicat.

TABLA 6.5 Requisitos químicos y de finura de ASTM para el cemento portland (ASTM C150).

Tipo de cemento portland	Porcentaje máximo de los compuestos (%)				Finura de Blaine
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	(m^2/kg)
I	55	19	10	7	370
II	51	24	6	11	370
III	56	19	10	7	540
IV	28	49	4	12	380
V	38	43	4	9	380

6.9.2 Otros tipos de cemento

Además de los cinco tipos estándar de cemento portland, en Estados Unidos se fabrican diversos cementos hidráulicos, entre los que se incluyen:

- Cemento portland blanco
- Cementos hidráulicos mezclados
  - Cemento portland con escoria de horno alto (Tipo es)
  - Cemento portland-puzolana (Tipo IP y Tipo P)
  - Cemento de escoria (Tipo S)
  - Cemento portland modificado con puzolana (Tipo I(PM))
  - Cemento portland modificado con escoria (Tipo I(SM))
- Cementos para mampostería
- Cementos expansivos (Tipo K)
- Cementos especiales.

En general, estos cementos tienen aplicaciones limitadas. Los ingenieros civiles y de la construcción deben conocer su existencia, pero tendrán que estudiar sus características más en detalle antes de utilizarlos.

6.10 Agua para la mezcla

Cualquier agua potable es adecuada para fabricar hormigón. Sin embargo, también pueden ser adecuados algunos tipos de agua no potable. Frecuentemente, los suministradores de los materiales utilizarán agua no procesada de la superficie o de pozos, si pueden obtenerla a un coste inferior que el agua procesada. Sin embargo, las impurezas en el agua de mezcla pueden afectar al tiempo de fraguado del hormigón, a su resistencia y su durabilidad a largo plazo. Además, los iones de cloruro en el agua de mezcla pueden acelerar la corrosión de las armaduras de acero.

6.10.1 Criterios de aceptación del agua

Los criterios de aceptación para una fuente de agua cuestionable están especificados en ASTM C94. Después de siete días, la resistencia a la compresión de unos cubos de mortero fabricados con agua procedente de una fuente cuestionable no debe ser inferior al 90% de la resistencia de los cubos fabricados con agua potable o destilada (ASTM C109). Asimismo, el tiempo de fraguado de la pasta de cemento hecha con el agua cuestionable no debe ser más de una hora inferior o más de 1-1/2 hora superior (medido mediante el aparato de Vicat), (ASTM C191), que el tiempo de fraguado de la pasta hecha con agua potable o destilada.

Otros efectos adversos provocados por la existencia de demasiadas impurezas en el agua de mezcla incluye las eflorescencias (manchas blancas que aparecen en la superficie del hormigón debido a la formación de carbonato cálcico), otros tipos de manchas, la corrosión de las armaduras de acero, la inestabilidad volumétrica y una reducción de la durabilidad. Por tanto, además de las especificaciones que afectan a la resistencia a la compresión y al tiempo de fraguado, existen límites químicos máximos que no deben excederse en el agua de mezcla, como se detalla en la Tabla 6.6. Hay disponibles diversas pruebas que permiten evaluar las impurezas químicas del agua procedente de una fuente cuestionable. En el agua de mezcla puede haber más de 100 compuestos e iones diferentes que pueden afectar a la calidad del hormigón. Los efectos más importantes se describen en la Tabla 6.7.

6.10.2 Eliminación y reutilización del agua de lavado del hormigón

La eliminación del agua residual de los procesos de fabricación del hormigón premezclado constituye un importante problema para los fabricantes (Chini y Mbwambo, 1996). Estas aguas residuales suelen generarse a partir de los sistemas de lavado de los camiones, del lavado de la planta central de mezclado, de las aguas de lluvia captadas en el terreno de la cementera, de las aguas generadas por los sistemas de control de polvo por rociado y del lavado de las cintas transportadoras. De acuerdo con las normas aplicables en ciertos países, el agua residual de la fabricación de hormigón premezclado se considera una sustancia dañina (contiene sosa cáustica y carbonato potásico) y su eliminación está regulada, en Estados unidos, por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA, *Environmental Protection Agency*). Además, el alto pH de esta agua residual de la fabricación del hormigón hace que dicha agua se considere peligrosa según la definición de corrosividad de la EPA.

Las prácticas convencionales para la eliminación del agua residual de la fabricación del hormigón incluyen el vertido en el lugar de la instalación o en un vertedero, o el vertido en una fosa para aguas residuales de hormigón en la propia cementera. La disponibilidad de vertederos para deshacerse del agua residual del hormigón se ha reducido enormemente en las últimas décadas. Además, las actuales restricciones medioambientales prohíben o limitan estas prácticas convencionales de eliminación. Como resultado, muchas cementeras han desarrollado diversas configuraciones operativas para gestionar sus propias aguas residuales. Las alternativas incluyen tanques de

TABLA 6.6 Límites químicos para el agua utilizada en las mezclas (ASTM C94) (Copyright ASTM, reimpreso con su permiso).

Componente químico	Concentración máxima (ppm)	Método de prueba
Cloruro, como Cl		ASTM D512
Hormigón pretensado u hormigón para cubiertas de puentes	500	
Otros tipos de hormigón reforzado en entornos húmedos o que contengan incrustaciones de aluminio o metales diferentes, o con elementos metálicos galvanizados	1.000	
Sulfato, como SO_4	3.000	ASTM D516
Álcalis, como (Na_2O + 0,658 K_2O)	600	
Sólidos totales	50.000	AASHTO T26

asentamiento, instalaciones para la detección/retención del agua de lluvia y sistemas de reutilización del agua. También se han empleado aditivos de estabilización química para no tener que eliminar el agua residual de los tambores de hormigón de los camiones y para permitir que ese agua se reutilice para mezclar más hormigón. Diversos estudios permiten afirmar que las propiedades del hormigón no se ven afectadas significativamente por el uso de aguas residuales estabilizadas (Borger *et al.,* 1994).

Actualmente, las aguas residuales del hormigón se utilizan como agua de mezcla para el hormigón en muchos lugares de Estados Unidos. Sin embargo, algunos organismos gubernamentales no permiten su uso, a causa de la existencia de otras impurezas derivadas de los aditivos del hormigón.

6.11 Aditivos para el hormigón

Los aditivos son ingredientes distintos del propio cemento portland, del agua y de los áridos, que pueden añadirse al hormigón para proporcionar una cualidad específica a la mezcla plástica (fresca) o al hormigón endurecido (ASTM C494). Algunos aditivos se añaden a la mezcla en forma de soluciones. En tales casos, el líquido debe considerarse parte del agua de mezcla. Si los aditivos no pueden añadirse en solución, se pesan o se mide su volumen, según recomiende el fabricante. Los aditivos se clasifican según las características físicas funcionales y químicas (Hewlett, 1978):

1. Agentes aireantes.

TABLA 6.7 Resumen de efectos de las impurezas del agua sobre la calidad del hormigón.

Impureza	Efecto
Álcalis, carbonato y bicarbonato	Puede retardar o acelerar el fraguado para las pruebas de resistencia y la resistencia a los 28 días, cuando las sales totales disueltas exceden de 1000 ppm. También puede agravar la reacción álcali–árido.
Cloruro	La corrosión de las armaduras de acero es un problema fundamental. El cloruro puede introducirse en la mezcla a través de los aditivos, los áridos, el cemento y el agua para la mezcla, de modo que los límites se expresan en términos del número total de iones cloruro libres. El instituto ACI limita el contenido en iones solubles en agua, basándose en el tipo de refuerzo: Hormigón pretensionado 0,06% Hormigón reforzado expuesto a cloruro durante su vida útil 0,15% Hormigón reforzado protegido de la humedad 1,00% Otros tipos de hormigón reforzado 0,30%
Sulfato	Puede provocar una reacción expansiva y el consiguiente deterioro.
Otras sales	No son dañinas si las concentraciones se limitan a Bicarbonato cálcico 400 ppm Bicarbonato de magnesio 400 ppm Sulfato de magnesio 25.000 ppm Cloruro de magnesio 40.000 ppm Sales de hierro 40.000 ppm Sulfuro de sodio 100 ppm
Agua marina	No utilizar para hormigón reforzado. Puede acelerar la ganancia de resistencia pero reduce la resistencia máxima. Puede agravar la reacciones con el álcali.
Agua ácida	Limite las concentraciones de ácido clorhídrico, sulfúrico y otros ácidos inorgánicos a menos de 10.000 ppm.
Agua alcalina	Posible incremento en la reacción álcali–árido. El hidróxido de sodio puede provocar un fraguado rápido a concentraciones superiores al 0,5%. La resistencia puede disminuir. El hidróxido de potasio, en concentraciones superiores al 1,2%, puede reducir la resistencia a los 28 días en algunos cementos.
Aguas fecales	Diluya el agua para reducir la materia orgánica a menos de 20 ppm.
Azúcares	Las concentraciones por encima de 500 ppm pueden retardar el tiempo de fraguado y alterar el desarrollo de la resistencia. La sacarosa en el rango entre 0,03 y aproximadamente el 0,15% suele retardar el fraguado. Las concentraciones superiores al 0,25% en peso del cemento pueden acelerar la ganancia de resistencia, pero reducen sustancialmente la resistencia a los 28 días.
Hidrocarburos	El aceite mineral (petróleo) en exceso de 2,5% en peso de la mezcla puede reducir la resistencia en un 20%.
Algas	Puede reducir la hidratación y la aireación. No utilice agua que tenga algas.

2. Reductores de agua.
3. Retardadores.
4. Aditivos de control de la hidratación.
5. Aceleradores.
6. Aditivos cementosos suplementarios.
7. Aditivos especializados

La Asociación de cemento portland de Estados Unidos (PCA) identifica cuatro razones principales para el uso de aditivos (Kosmatka *et al.*, 2002):

1. Para reducir el coste de fabricación del hormigón.
2. Para dotar al hormigón de ciertas propiedades de forma más efectiva que por otros medios.
3. Para garantizar la calidad del hormigón durante las etapas de mezclado, transporte, colocado y curación en condiciones climatológicas adversas.
4. Para responder a ciertas emergencias durante las operaciones con el hormigón.

6.11.1 Agentes aireantes

Los aireantes producen diminutas burbujas de aire en el hormigón endurecido, que dejan espacio para que el agua se expanda durante la congelación. A medida que se congela la humedad contenida en la estructura de poros del hormigón, hay tres mecanismos que contribuyen al desarrollo de esfuerzos internos en el mismo:

1. Saturación crítica: al congelarse, el agua expande su volumen en un 9%. Si el porcentaje de saturación excede el 91,7%, el incremento de volumen genera esfuerzos en el hormigón.
2. Presión hidráulica: el agua que se está congelando atrae agua no congelada hacia ella. El agua no congelada que se mueve a través de los poros del hormigón genera esfuerzos, dependiendo de la longitud del camino del flujo, de la velocidad de congelación, de la permeabilidad y de la concentración de sales en los poros.
3. Presión osmótica: el agua se desplaza desde el gel a los capilares para satisfacer el equilibrio termodinámico y ecualizar las concentraciones de álcali. Los huecos permiten que el agua fluya desde el espacio de hidratación intercapas y los capilares hacia los huecos de aire, donde tiene espacio para congelarse sin dañar la estructura.

Los esfuerzos internos reducen la durabilidad del hormigón endurecido, especialmente cuando los ciclos de congelación y descongelación se repiten muchas veces. El impacto de cada uno de estos mecanismos se ve mitigado proporcionando una red de diminutos huecos de aire en el hormigón endurecido, utilizando aireantes. A finales de la década de 1930, la introducción del mecanismo de aireación del hormigón representó un avance significativo en la tecnología del hormigón. La aireación se recomienda para todos los hormigones expuestos a la congelación.

Todo hormigón contiene huecos de aire atrapado que tienen diámetros de 1 mm o mayores y que representan aproximadamente entre el 0,2% y el 3% del volumen del hormigón. Los huecos de aire provocados por el mecanismo de aireación tienen diá-

metros que varían entre 0,01 mm y 1 mm, siendo la mayoría de ellos inferiores a 0,1 mm. Los huecos debidos al mecanismo de aireación no están conectados entre sí y representan un volumen total comprendido entre el 1% y el 7,5% del volumen del hormigón. El hormigón mezclado para resistir condiciones severas de congelación debe contener aproximadamente 14.000 millones de burbujas por metro cúbico. La resistencia a la congelación mejora al reducir el tamaño de las burbujas, y las burbujas de pequeño tamaño también reducen la resistencia, pero menos que las de mayor tamaño. La finura de las burbujas de aire se mide mediante el índice superficial específico, que es igual al área superficial total de las burbujas en una unidad de volumen de pasta. El índice superficial específico tiene que ser mayor que 23.600 m^2/m^3 (600 pulg.^{2}/pulg^3) para poder resistir la congelación.

Además de mejorar la durabilidad, la aireación proporciona otras ventajas importantes tanto al hormigón recién mezclado como al endurecido. La aireación mejora la resistencia del hormigón a diversos factores destructivos como los ciclos de congelación/descongelación, la acción de los descongelantes y sales, la acción de los sulfatos y la reactividad álcali–silicio. La aireación también facilita el trabajo con el hormigón fresco y reduce la resistencia del hormigón, como se muestra en la Figura 6.7; sin embargo, este efecto puede reducirse para el hormigón de resistencia moderada, reduciendo la relación agua–materiales cementosos e incrementando la proporción de cemento. De todos modos, es difícil obtener una alta resistencia con hormigón aireado.

Los aditivos de aireación son suministrados por distintos fabricantes y pueden estar compuestos por diversos materiales como,

Sales de resinas de madera (resina Vinsol).
Detergentes sintéticos.
Sales de lignina sulfonada (subproducto de la producción de papel).
Sales de ácidos de petróleo.
Sales de material proteínico.
Ácidos grasos y resinosos.
Sulfonato de alquilobenceno.
Sales de hidrocarburos sulfonados.

Normalmente, los agentes de aireación son líquidos y deben satisfacer las especificaciones ASTM C260. Estos agentes mejoran la aireación reduciendo la tensión superficial del agua de la mezcla. Los agentes de aireación aniónicos son hidrofóbicos (huyen del agua). La carga negativa del agente es atraída por la carga positiva de la partícula de cemento. El agente hidrofóbico forma burbujas resistentes, elásticas y rellenas de aire. La mezcla dispersa las burbujas de aire por la pasta y las partículas de arena forman una retícula que mantiene en su sitio a las burbujas de aire. Otros tipos de agentes de aireación emplean distintos mecanismos de actuación, pero producen resultados similares.

6.11.2 Reductores de agua

Para facilitar el trabajo con el hormigón fresco o plástico hace falta añadir más agua que la necesaria para la hidratación. El exceso de agua, más allá de los requisitos de hidra-

tación, resulta perjudicial para todas las propiedades deseables del hormigón endurecido. Por tanto, se han desarrollado aditivos reductores de agua para mejorar la facilidad de trabajo con el hormigón y, al mismo tiempo, mantener sus cualidades. Los reductores de agua incrementan la movilidad de las partículas de cemento en la mezcla plástica, permitiendo conseguir una igual facilidad de trabajo del hormigón con un menor contenido de agua. Los reductores de agua se producen con diferentes niveles de efectividad: convencionales, de gama media y de gama alta. La Figura 6.8 muestra un hormigón al que no se le ha añadido ningún aditivo y sendas mezclas a las que se les han añadido reductores convencionales, de gama media y de gama alta. Como puede ver en la figura, el grado de asentamiento del hormigón aumenta, lo que indica que es más fácil trabajarlo. El reductor de agua de gama alta suele denominarse superplastificante.

Mecanismo de los reductores de agua Los granos de cemento desarrollan una carga eléctrica estática en su superficie como resultado del proceso de molido del cemento. Las cargas diferentes se atraen haciendo que los gránulos de cemento se agrupen o "floculen"

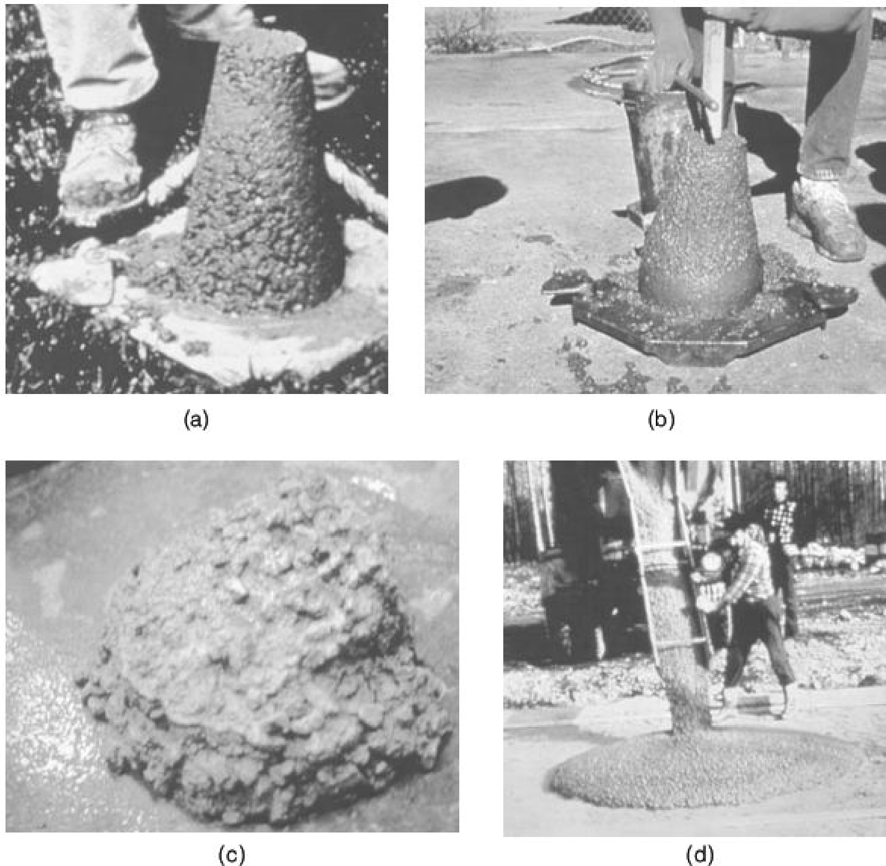


FIGURA 6.8 Asentamiento de hormigones con la misma relación agua-cemento: (a) sin reductor de agua, (b) reductor de agua convencional, (c) reductor de agua de gama media y (d) reductor de agua de gama alta (superplastificante).

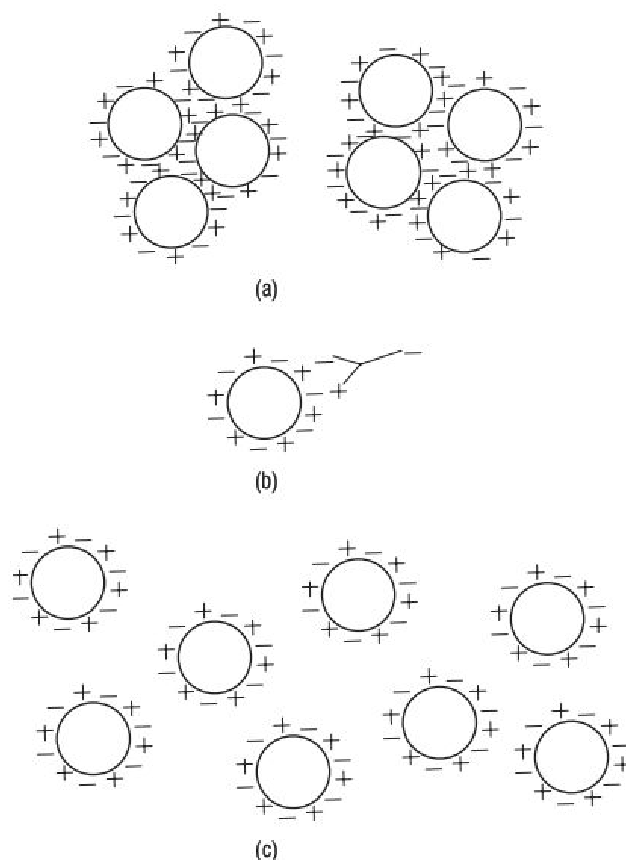


FIGURA 6.9 Mecanismo de actuación de un reductor de agua: (a) agrupación de los gránulos de cemento sin reductor de agua, (b) molécula de un reductor de agua y (c) la distribución de los gránulos de cemento mejora gracias al uso de un reductor de agua.

[Figura 6.9(a)], lo que a su vez limita la facilidad de trabajo. Los productos químicos contenidos en los reductores de agua reducen la atracción estática entre las partículas de cemento. Las moléculas de los aditivos reductores de agua tienen cargas positiva y negativa en un extremo y una única carga (normalmente negativa) en el otro extremo, como se ilustra en la Figura 6.9(b). Estas moléculas son atraídas por la superficie cargada de los gránulos de cemento. Los reductores de agua neutralizan la atracción estática entre las superficies de los gránulos de cemento. Como resultado, las agrupaciones de gránulos se parten. La repulsión mutua de las cargas del mismo signo hace que los gránulos de cemento se alejen entre sí, consiguiendo una mejor distribución de las partículas [véase la Figura 6.9(c)], una hidratación más uniforme y una pasta menos viscosa.

Los aditivos reductores de agua pueden utilizarse de forma indirecta para aumentar la resistencia. Puesto que esos aditivos incrementan la facilidad de trabajo con el hormigón, podemos aprovechar este fenómeno para reducir la cantidad de agua de la mezcla, lo que a su vez reduce la relación agua–materiales cementosos y aumenta

TABLA 6.8 Efectos de un reductor de agua.

	Contenido de cemento kg/m^3	Relación agua–cemento	Asentamiento (mm)	Resistencia a la compresión (MPa)	
				7 días	28 días
Mezcla base	300	0,62	50	25	37
Mejora de la consistencia	300	0,62	100	26	38
Aumento de la resistencia	300	0,56	50	34	46
Reducción del coste	270	0,62	50	25,5	37,5

la resistencia. Hewlett (1978) demostró que los reductores de agua pueden utilizarse para conseguir tres objetivos diferentes, como se indica en la Tabla 6.8.

1. Se puede añadir un reductor de agua sin alterar los otros porcentajes de la mezcla, con lo que se incrementa el grado de asentamiento, que es una medida de la consistencia del hormigón y un indicador de la facilidad con la que se puede trabajar con el mismo, como veremos en el Capítulo 7.
2. La resistencia de la mezcla puede incrementarse utilizando un reductor de agua y rebajando la cantidad de agua mientras se mantiene el contenido de cemento constante.
3. El coste de la mezcla, que está determinado principalmente por la cantidad de cemento, puede reducirse. En este caso, el reductor de agua permite reducir la cantidad de agua, lo que a su vez permite reducir la cantidad de cemento manteniendo la relación agua–materiales cementosos igual a la de la mezcla original. De esta manera, la calidad de la mezcla, medida según la resistencia a la compresión se mantiene constante, aunque se disminuye la cantidad de cemento.

Superplastificantes Los superplastificantes o reductores de agua de gama alta pueden incrementar enormemente el flujo del hormigón fresco o reducir la cantidad de agua requerida para obtener una determinada consistencia. Por ejemplo, la adición de un superplastificante a un hormigón con un grado de asentamiento de 75 mm (3 pulgadas) puede incrementar el grado de asentamiento en 230 mm (9 pulgadas), o bien puede mantenerse el grado de asentamiento original reduciendo el contenido de agua entre un 12% y un 30%. La reducción de la cantidad de agua de la mezcla hace que disminuya la relación agua–materiales cimentosos, lo que a su vez incrementa la resistencia del hormigón endurecido. De hecho, el uso de superplastificantes ha representado uno de los principales avances dentro de la industria del hormigón. Ahora, puede fabricarse hormigón de alta resistencia, del orden de 70–80 MPa (10.000-12.000 psi) de resistencia a la compresión o más cuando se utilizan superplastificantes. Los superplastificantes pueden emplearse en los siguientes casos:

1. Cuando sea ventajoso disponer de una baja relación agua–materiales cementosos (por ejemplo, hormigón de alta resistencia, hormigón con una buena ganancia inicial de resistencia y hormigón con porosidad reducida).
2. Para colocar secciones delgadas de hormigón.
3. Para colocar el hormigón alrededor de armaduras de acero con espaciados muy pequeños.
4. Para colocar cemento bajo el agua.
5. Para colocar el hormigón mediante bombeo.
6. Cuando la consolidación del hormigón sea difícil.

Cuando se utilizan superplastificantes, el hormigón fresco sigue siendo trabajable durante un corto periodo de tiempo, entre 30 y 60 minutos, después del cual se produce una rápida pérdida en la capacidad de trabajar el hormigón. Los superplastificantes suelen añadirse en la planta de fabricación para garantizar la consistencia del hormigón. En situaciones críticas, pueden añadirse en el lugar de instalación, pero el hormigón debe mezclarse cuidadosamente después de agregar el aditivo. El tiempo de fraguado varía según el tipo de agente, la cantidad utilizada y las interacciones con otros aditivos que puedan haberse empelado en el hormigón.

6.11.3 Retardantes

Algunas condiciones de construcción requieren que se incremente el tiempo disponible entre la mezcla y la colocación o acabado del hormigón. En tales casos, pueden emplearse retardantes para retrasar el fraguado inicial del hormigón. Los retardantes se utilizan por diversas razones, por ejemplo:

1. Compensar el efecto de un clima cálido.
2. Permitir lugares de colocación inusuales o distancias de transporte grandes.
3. Proporcionar el tiempo necesario para conseguir acabados especiales (por ejemplo, con árido expuesto).

Los retardantes pueden reducir la resistencia del hormigón en las primeras etapas (por ejemplo, entre uno y tres días). Además, algunos retardantes atrapan burbujas de aire y facilitan el trabajo del hormigón. Otros retardantes incrementan el tiempo requerido para el fraguado inicial, pero reducen el tiempo entre ese fraguado inicial y el fraguado final. Las propiedades de los retardantes varían según los materiales empleados en la mezcla y las condiciones de trabajo. Por tanto, el uso y efecto de los retardantes debe evaluarse experimentalmente durante el proceso de diseño de la mezcla.

6.11.4 Aditivos de control de la hidratación

Estos aditivos tienen la capacidad de detener y reactivar el proceso de hidratación del hormigón. Están compuestos de dos partes: un estabilizador y un activador. La adición del estabilizador detiene completamente la hidratación de los materiales cementosos hasta 72 horas, mientras que la adición del activador al hormigón estabilizado restable-

ce el proceso normal de hidratación y fraguado. Estos aditivos son muy útiles para ampliar el tiempo de uso del hormigón premezclado cuando se detiene el trabajo por alguna razón. También son útiles cuando se tiene que transportar el hormigón a larga distancia.

6.11.5 Aceleradores

Los aceleradores se utilizan para que se desarrolle la resistencia inicial del hormigón a una velocidad mayor que en el hormigón normal. Sin embargo, la resistencia máxima del hormigón con alta resistencia inicial es más o menos la misma que la del hormigón normal. Los aceleradores se usan para:

1. Reducir el tiempo requerido antes de que comiencen las operaciones de terminación.
2. Reducir el tiempo de curación.
3. Aumentar la velocidad de ganancia de resistencia.
4. Tapar fugas de manera eficiente en presencia de presiones hidráulicas.

Las tres primeras razones son particularmente aplicables a los trabajos con hormigón en condiciones climatológicas frías. El incremento de resistencia ayuda a proteger al hormigón de la congelación y la rápida velocidad de hidratación genera calor que puede reducir el riesgo de congelación.

El cloruro de calcio, $CaCl_2$, es el acelerador más ampliamente utilizado (ASTM D98). Con el cloruro de calcio se reducen tanto el tiempo de fraguado inicial como el final. El tiempo de fraguado inicial de 3 horas para un hormigón típico puede reducirse a 1,5 horas añadiendo una cantidad de cloruro de calcio igual al 1% del peso del cemento; un 2% reduce el tiempo de fraguado inicial a una hora. Los tiempos de fraguado finales típicos son de seis, tres y dos horas para un 0%, un 1% y un 2% de cloruro de calcio, respectivamente. La Figura 6.10 muestra que la resistencia desarrollada también se ve afectada por el $CaCl_2$, mostrándose los valores correspondientes al hormigón de cemento portland normal (PCC) y al hormigón de cemento portland con un 2% de cloruro de calcio. El hormigón con $CaCl_2$ desarrolla una resistencia inicial mayor, comparado con el hormigón normal curado a la misma temperatura (Hewlett, 1978).

La asociación PCA recomienda no utilizar el cloruro de calcio en las siguientes condiciones:

1. Si el hormigón es pretensado.
2. Si el hormigón contiene aluminio incrustado, y especialmente si el aluminio está en contacto con acero.
3. Si el hormigón está sujeto a reacciones álcali–árido.
4. Si el hormigón está en contacto con agua o suelos que contengan sulfatos.
5. Si el hormigón se coloca en condiciones climatológicas cálidas.
6. En aplicaciones en masa del hormigón.

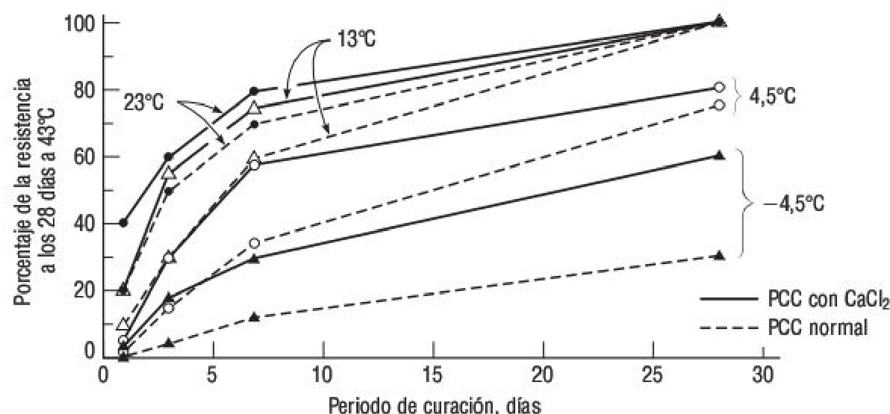


FIGURA 6.10 Efectos del $CaCl_2$ sobre el desarrollo de la resistencia para diferentes temperaturas de curación.

El Instituto americano del hormigón (ACI, *American Concrete Institute*) recomienda los siguientes límites para el contenido de iones de cloruro solubles en agua; estos límites están basados en el porcentaje de peso del cemento (American Concrete Institute, 1986):

Tipo de elemento	Límite de iones de cloruro, %
Hormigón pretensado	0,06
Hormigón reforzado sujeto a la presencia de cloruros durante su vida útil	0,15
Hormigón reforzado protegido de la humedad	1,00
Otros tipos de hormigón reforzado	0,30

Hay disponibles varias alternativas al uso del cloruro de calcio. Entre ellas, podemos citar las siguientes:

1. La utilización de cemento de alta resistencia inicial (Tipo III).
2. Incrementar el contenido de cemento.
3. Realizar la curación a temperaturas más altas.
4. Utilizar aceleradores distintos del cloruro de calcio, como la trietanolamina, el tiocianato de sodio, el formato cálcico, el nitrito cálcico o el nitrato cálcico.

6.11.6 Aditivos cementosos suplementarios

Con el hormigón se han empleado diversos subproductos de otras industrias como aditivos cementosos suplementarios desde la década de 1970, especialmente en Norteamérica. Estos materiales se han estado utilizando para mejorar algunas propiedades del hormigón y para reducir los problemas derivados de descartar esos materiales. Puesto

que esos materiales son cementosos, pueden utilizarse además del cemento portland o para sustituirlo parcialmente. De hecho, en algunas aplicaciones se han usado conjuntamente dos o más de estos aditivos cementosos suplementarios para mejorar las propiedades del hormigón. Estos materiales cementosos suplementarios incluyen el polvo de ceniza, las escorias de horno alto molidas, el humo de sílice y las puzolanas naturales.

Ceniza en polvo La ceniza en polvo es la puzolana más comúnmente utilizada en las estructuras de ingeniería civil. La ceniza en polvo es un subproducto de la industria del carbón. Al quemar el carbón pulverizado en una planta de energía eléctrica, se queman el carbono y la mayoría de los materiales volátiles. Sin embargo, dependiendo del origen y del tipo de carbón, una cantidad significativa de impurezas pasa a través de la cámara de combustión. El contenido de carbono de los carbones comunes va del 70% al 100%. El porcentaje no correspondiente a carbono son impurezas (por ejemplo, arcilla, feldespato, cuarzo y esquistos), que se funden al pasar por la cámara de combustión. El gas de salida transporta el material fundido, la ceniza en polvo, hacia fuera de la cámara de combustión. La ceniza en polvo se enfría formando pequeñas esferas, que pueden ser sólidas, huecas (cenosferas) o huecas y rellenas con otras esferas (pleroesferas). El diámetro de las partículas va de 1 μm a más de 0,1 mm, con una media de entre 0,015 mm y 0,020 mm, y entre el 70% y el 90% de ellas tienen un tamaño inferior a 0,045 mm. La ceniza en polvo es fundamentalmente un vidrio de sílice compuesto de sílice (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y cal (CaO). La ceniza en polvo se clasifica (ASTM C618) como sigue:

Clase N: puzolanas naturales en bruto o calcinadas, incluyendo tierras diatomaceas, pedernales opalinos y esquistos, cenizas volcánicas o piedra pómez y algunos esquistos y arcillas calcinados.
Clase F: ceniza en polvo con propiedades de puzolana.
Clase C: ceniza en polvo con propiedades de puzolana y cementosas.

La ceniza en polvo de clase F suele contener menos de un 5% de CaO pero puede contener hasta un 10%. La ceniza en polvo de clase C tiene entre un 15% y un 30% de CaO.

La forma esférica de la ceniza en polvo mejora la capacidad de trabajar el hormigón fresco. Además, amplía el proceso de hidratación permitiendo que se desarrolle una mayor resistencia y que la porosidad se reduzca. Una serie de estudios han demostrado que el hormigón que contiene más de un 20% de ceniza en polvo del peso del cemento tiene una distribución de tamaño de los poros mucho más pequeña que el hormigón de cemento portland sin ceniza en polvo. El menor calor de hidratación reduce la resistencia inicial del hormigón, pero el tiempo de reacción ampliado permite una ganancia continua de resistencia, más allá de la que puede obtenerse con el cemento portland normal.

Escoria de horno alto molida La escoria de horno alto molida (escoria GGBF, *Ground Granulated Blast Furnace*) está hecha de escorias procedentes de hornos altos de hierro. Es un cemento hidráulico no metálico compuesto básicamente de silicatos y aluminosili-

catos de calcio, que se desarrolla en condición fundida simultáneamente con el hierro, dentro del horno alto. La escoria fundida se enfría rápidamente sumergiéndola en agua, con lo que pasa a formar un material granulado vítreo parecido a la arena. Ese material se muele a continuación para obtener un tamaño de partícula inferior a 45 micras. La gravedad específica de la escoria GGBF está comprendida entre 2,85 y 2,95.

La escoria molida, rugosa y con formas angulares, se hidrata en presencia de agua y de un activador, NaOH o CaOH, ambos suministrados por el cemento portland, y se fragua de forma similar al cemento portland.

La escoria molida se ha utilizado como material cementoso en el hormigón desde principios del siglo XX. La escoria de horno alto molida suele representar entre un 30% y un 45% del material cementoso de la mezcla. Algunos hormigones de escoria tienen un 70% o más de escoria como material cementoso. La norma ASTM C 989 (AASHTO M 302) clasifica la escoria según un nivel creciente de reactividad, asignándole la calidad 80, 100 o 120.

Humo de sílice El humo de sílice es un subproducto de la fabricación de aleaciones ferrosilicosas o de metales silíceos. Uno de los usos más beneficiosos del humo de sílice es como aditivo mineral en el hormigón. Debido a sus propiedades físicas y químicas es una puzolana muy reactiva. El hormigón con humo de sílice puede tener una alta resistencia y una gran durabilidad. Los fabricantes de aditivos para el hormigón comercializan el humo de sílice y, si se especifica su uso, basta con añadirlo durante la producción del hormigón, ya sea esta según un proceso húmedo o seco. La colocación, acabado y curación del hormigón con humo de sílice requiere una especial atención por parte del proveedor del hormigón.

El metal de silicio y aleaciones se fabrican en hornos eléctricos. Las materias primas son el cuarzo, el carbón y astillas de madera. El humo resultante de la operación del horno se recoge y se vende como humo de sílice.

El humo de sílice está compuesto principalmente por dióxido de silicio (SiO_2) amorfo (no cristalino). Las partículas individuales son extremadamente pequeñas, teniendo aproximadamente una centésima parte del tamaño medio de una partícula de cemento. Debido a sus finas partículas, a su gran área superficial y su alto contenido en SiO_2, el humo de sílice es una puzolana muy reactiva cuando se utiliza en el hormigón. La calidad del humo de sílice se especifica en las normas ASTM C 1240 y AASHTO M 307.

Además de producir hormigón de alta resistencia, el humo de sílice puede reducir la corrosión del hormigón inducida por los anticongelantes o las sales marinas. El hormigón de humo de sílice con un bajo contenido de agua es altamente resistente a la penetración por parte de iones de cloruro. Puede encontrar más información sobre este tema en el sitio web www.silicafume.org.

Puzolanas naturales Una puzolana es un material silíceo y aluminoso que, por sí mismo no posee ningún valor cementoso, o muy poco, pero que si se suministra en partículas muy finas y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de

TABLA 6.9 Efecto de los aditivos cementosos suplementarios sobre el hormigón recién mezclado.

Medida de calidad	Efecto
Necesidades de agua	La ceniza en polvo reduce las necesidades de agua. El humo de sílice incrementa las necesidades de agua.
Contenido de aire	La ceniza en polvo y el humo de sílice reducen el contenido de aire, lo que puede compensarse incrementando la cantidad de agentes aireantes.
Facilidad de trabajo	La ceniza en polvo, la escoria molida y los minerales inertes suelen facilitar el trabajo con el hormigón. El humo de sílice hace más difícil el trabajo del hormigón; utilice un superplastificante para compensar.
Hidratación	La ceniza en polvo reduce el calor de hidratación. El humo de sílice puede afectar al calor, pero si se emplea con un superplastificante, el calor puede incrementarse.
Tiempo de fraguado	La ceniza en polvo, las puzolanas naturales y la escoria de horno alto incrementan el tiempo de fraguado. Puede utilizarse un acelerador para compensar.

calcio a temperaturas normales para formar compuestos que presentan propiedades cementosas (ASTM C595). Las puzolanas presentes en la naturaleza, como las cenizas volcánicas finas, combinadas con cal calcinada ya se usaban hace 2000 años para la construcción de edificios, y las puzolanas continúan utilizándose hoy día. Como se muestra en la Tabla 6.2, el hidróxido de calcio es uno de los productos generados por la hidratación del C_3S y C_2S. De hecho, hasta un 15% del peso del cemento portland es cal hidratada. La adición de una puzolana al cemento portland genera una oportunidad de convertir esta cal, que está disponible de forma gratuita, en un material cementoso.

Las Tablas 6.9 y 6.10 resumen los efectos de los aditivos cementosos suplementarios sobre el hormigón fresco y endurecido. Estos resúmenes están basados en tendencias generales y deben verificarse experimentalmente para cada material específico y para cada condición de construcción concreta.

6.11.7 Aditivos especializados

Además de los aditivos anteriormente mencionados, hay disponibles muchos otros aditivos que permiten mejorar la calidad del hormigón de diversas formas. El ingeniero civil debe ser consciente de la existencia de estos aditivos, pero tendrá que estudiar su aplicación en detalle, así como su coste, antes de utilizarlos. Como ejemplos de aditivos especializados podemos citar:

Agentes para mejora de la facilidad de trabajo del hormigón.
Inhibidores de la corrosión.
Agentes impermeabilizantes.
Agentes reductores de la permeabilidad.

TABLA 6.10 Efecto de los aditivos cementosos suplementarios sobre el hormigón endurecido.

Medida de calidad	Efecto
Resistencia	La ceniza en polvo incrementa la resistencia máxima, pero reduce la velocidad de ganancia de resistencia. El humo de sílice tiene menos efecto sobre la velocidad de ganancia de resistencia que las puzolanas.
Contracción por secado y reptación	Normalmente, bajas concentraciones tienen muy poco efecto. Las altas concentraciones de escoria molida o de ceniza en polvo pueden incrementar la contracción. El humo de sílice puede reducir la contracción.
Permeabilidad y absorción	Generalmente reducen la permeabilidad y la absorción. El humo de sílice es especialmente efectivo.
Reactividad álcali–árido	Reactividad generalmente reducida. El grado de mejora depende del tipo de aditivo.
Resistencia a los sulfatos	Mejora debido a la reducción de la permeabilidad.

Aditivos fungicidas, germicidas e insecticidas.
Agentes de ayuda al bombeo.
Agentes de enlace.
Agentes de enlechado.
Agentes de formación de gas.
Agentes de coloreado.
Reductores de contracción.

RESUMEN

El desarrollo del cemento portland como material aglomerante para el hormigón es una de las innovaciones más importantes de la ingeniería civil. Resulta extremadamente difícil encontrar proyectos de ingeniería civil que no incluyan algún componente construido con hormigón de cemento portland. Las propiedades del cemento portland están gobernadas por la composición química y la finura de las partículas. Estas propiedades controlan a su vez la velocidad de hidratación y la resistencia máxima del hormigón. El descubrimiento de Abrams de la importancia de la relación agua-materiales cementosos como factor de control de la calidad del hormigón es, quizá, el avance individual más importante en la tecnología del hormigón. Después de este desarrollo, otro avance de enorme importancia fue la introducción de los agentes de aireación. El subsiguiente desarrollo de aditivos adicionales para el hormigón ha permitido mejorar la fa-

cilidad del trabajo, el tiempo de fraguado, la resistencia y la economía de las construcciones con hormigón.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

6.1 ¿Qué ingredientes se utilizan en la producción del cemento portland?

6.2 ¿Cuál es el papel del yeso en la producción del cemento portland?

6.3 ¿Cuál es el valor típico de la finura del cemento portland?

6.4 ¿Cuáles son las principales reacciones químicas que tienen lugar durante la hidratación del cemento portland?

6.5 Defina la fase C-S-H de la pasta de cemento.

6.6 ¿Cuáles son los cuatro componentes químicos principales del cemento portland?

6.7 ¿Qué componentes químicos contribuyen a la ganancia de resistencia inicial?

6.8 Defina
   a. Espacio de hidratación intercapas.
   b. Huecos capilares.
   c. Agentes aireantes.
   d. Aire atrapado.

6.9 Defina el *fraguado inicial* y el *fraguado final*. Explique brevemente un método utilizado para determinar los correspondientes tiempos.

6.10 Se realizan las siguientes pruebas de laboratorio:
   a. Prueba de medida del tiempo de fraguado de una serie de muestras de pasta de cemento.
   b. Resistencia a la compresión de cubos de mortero.

   ¿Cuál es el significado de cada una de estas pruebas y para qué se utilizan?

6.11 ¿Qué es un fraguado falso de cemento portland? Indique una razón para que se produzca este tipo de fraguado. Si se encontrara, durante el trabajo con el cemento, que se ha producido un fraguado falso, ¿qué haría?

6.12 Imagine que es el ingeniero encargado de mezclar el hormigón en un área no desarrollada en la que no hay disponible agua potable para mezclar el hormigón. Se dispone de una fuente de agua que contiene algunas impurezas. ¿Qué pruebas haría para evaluar la idoneidad de esta agua para la mezcla de hormigón? ¿Qué criterios utilizaría?

6.13 La relación agua–materiales cementosos es importante porque influye sobre todas las cualidades deseables del hormigón.
   a. ¿Cuál es una relación típica de agua–materiales cementosos para el hormigón de resistencia normal?

b. ¿Cuál es la relación mínima agua–materiales cementosos para la hidratación?
c. ¿Por qué hace falta el agua adicional?
d. Describa brevemente cómo puede fabricarse hormigón de resistencia extremadamente alta (f'_c = 15.000 psi).

6.14 Explique el efecto que la relación agua–materiales cementosos tiene sobre la calidad del hormigón endurecido. Explique por qué tiene lugar este efecto.

6.15 Dibuje una gráfica para mostrar la relación general existente entre la resistencia a la compresión del hormigón y la relación de agua–materiales cementosos, para distintos tiempos de curación. Etiquete todos los ejes y curvas.

6.16 ¿Cuáles son los cinco tipos principales de cemento portland y cuáles son sus funciones? Describa una aplicación para cada tipo.

6.17 ¿Por qué no se utiliza puzolana con el cemento de Tipo III?

6.18 ¿Qué tipo de cemento emplearía en cada uno de los siguientes casos? ¿Por qué?
a. Construcción de un muelle de gran tamaño.
b. Construcción en una región de clima frío.
c. Construcción en una región de clima cálido.
d. Estructura de hormigón sin ningún tipo de especificación con respecto a la exposición a las condiciones ambientales.
e. Cimientos de un edificio en un suelo con una exposición intensa a los sulfatos.

6.19 Para evaluar la idoneidad del agua no potable disponible en el lugar de instalación para mezclar el hormigón, fabricamos seis cubos estándar de mortero con esa agua y otros seis con agua potable. Probamos los cubos para medir su resistencia a la compresión después de siete días de curación, obteniéndose las siguientes cargas hasta fallo (en libras).

Cubos hechos con agua no potable	Cubos hechos con agua potable
17.810	16.730
15.110	18.870
14.200	15.230
18.290	17.470
14.650	16.990
16.430	17.850

a. Basándose únicamente en estos resultados, ¿aceptaría esa agua para mezclarla con el hormigón de acuerdo con la norma ASTM C94?
b. Según la norma ASTM C94, ¿habría que llevar a cabo otras pruebas para evaluar la idoneidad de esa agua? Explique brevemente su respuesta.

6.20 Se han fabricado tres cubos de mortero estándar utilizando el agua no potable disponible en el lugar de la instalación, y otros tres utilizando agua potable. Se

prueba la resistencia a la compresión de los cubos después de siete días de curación, obteniéndose los siguientes resultados del valor de carga hasta fallo (en kips):

Agua no potable	Agua potable
15,2	17,1
14,5	18,6
15,9	16,2

Basándose únicamente en estos resultados, ¿aceptaría esa agua para mezclar el hormigón de acuerdo con los estándares ASTM? Explique su respuesta.

6.21 Explique el problema de la eliminación del agua residual de las operaciones con hormigón premezclado. Indique tres métodos alternativos que pueden utilizarse para aliviar este problema.

6.22 Enumere cinco tipos de aditivos y explique sus aplicaciones.

6.23 Si fuera un ingeniero de materiales que estuviera trabajando en una región con un clima frío y solo pudiera emplear un tipo de aditivo, ¿cuál seleccionaría? Explique su respuesta.

6.24 ¿Bajo qué condiciones se necesita un agente de aireación? ¿Por qué? Explique cómo realiza su función el agente de aireación.

6.25 Si se añade un reductor de agua a la mezcla de hormigón sin cambiar ningún otro ingrediente, ¿qué pasará con las propiedades del hormigón? Si la intención de añadir el reductor de agua es incrementar la resistencia a la compresión del hormigón endurecido, ¿cómo podría conseguirlo?

6.26 ¿Por qué se utilizan superplastificantes? ¿Cómo llevan a cabo su función?

6.27 Una mezcla de hormigón incluye los siguientes ingredientes por pie cúbico:

Cemento = 25 libras
Agua = 11 libras
Sin aditivos

La Tabla P6.27 (en la página siguiente) muestra los posibles cambios que pueden realizarse en los ingredientes de la mezcla. Indique en las casillas de la tabla apropiadas qué sucederá en cada caso, en lo que respecta a la facilidad de trabajo del hormigón y a la resistencia máxima a la compresión; indique si se *incrementa, decrementa* o es *aproximadamente la misma*.

6.28 Un ingeniero de materiales está trabajando en un proyecto de investigación para evaluar el efecto de un tipo de aditivo sobre la resistencia a la compresión del hormigón. Efectúa una prueba con 10 cubos de mortero hechos sin el aditivo y otros 10 con aditivo después de 28 días de curación. Las resistencias a la

Tabla P6.27

			¿Qué sucede?	
Cemento (libras)	Agua (libras)	Aditivo	Facilidad de trabajo	Resistencia máxima a la compresión
25	15	Ninguno		
28	11	Ninguno		
25	11	Reductor de agua		
25	8	Reductor de agua		
25	11	Superplastificante		
25	11	Agente de aireación		
25	11	Acelerador		

compresión de los cubos sin aditivo fueron 25,1; 24,4; 25,8; 25,2; 23,9; 24,7; 24,3; 26,0; 23,8 y 24,6 MPa. Las resistencias a la compresión de los cubos con aditivo fueron 25,3; 26,8; 26,5; 24,5; 27,2; 24,8; 24,1; 25,9; 25,3 y 25,0 MPa. Utilizando una prueba t estadística, ¿muestra este aditivo un incremento de la resistencia a la compresión del mortero de cemento con un nivel de significación de 0,05?

6.29 Un ingeniero de materiales está trabajando en un proyecto de investigación para evaluar el efecto de un tipo de aditivo sobre la resistencia a la compresión del hormigón. Realiza pruebas con ocho cubos de mortero con el aditivo y otros ocho sin el aditivo después de 28 días de curación. Las resistencias a la compresión de los cubos en psi con y sin aditivo se detallan en la Tabla P6.29.

Tabla P6.29

	Resistencia a la compresión, psi	
Cubo nº	Con aditivo	Sin aditivo
1	3520	3550
2	3645	3785
3	3715	3720
4	3500	3645
5	3414	3560
6	3685	3645
7	3545	3400
8	3515	3555

Utilizando una prueba *t* estadística, ¿hay alguna diferencia significativa entre las medias a la resistencia a la compresión de los dos morteros de cemento, con un nivel de significación de 0,10?

6.12 Referencias

American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete.* ACI Committee 318 Report, ACI 318-99. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1999.

Borger, J., R.L. Carrasquillo y D.W. Fowler. "Use of Recycled Wash Water and Returned Plastic Concrete in the Production of Fresh Concrete." *Advanced Cement Based Materials,* Noviembre (6), 1994.

Chini, S.A. and W.J. Mbwambo. "Environmentally Friendly Solutions for the Disposal of Concrete Wash Water from Ready Mixed Concrete Operations." *Proceedings, Beijing International Conference.* Beijing, 1996.

Hewlett, P. C. *Concrete Admixtures: Use and Applications.* Rixom, M.R., ed. Lancaster, UK: The Construction Press, 1978.

Hover, K. y R. E. Phillco. *Highway Materials Engineering, Concrete.* Publicación Nº No. FHWA-H1-90-009, NHI Course No. 13123. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 1990.

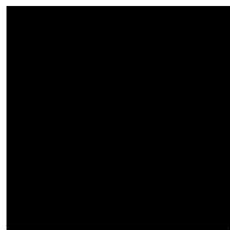
Kosmatka, S.H. y W.C. Panarese. *Design and Control of Concrete Structures.* Decimotercera edición. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1988.

Kosmatka, S. H., B. Kerkhoff y W. C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures.* Decimocuarta edición. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.

Mehta, P. K. y P. J. M. Monteiro. *Concrete Structure, Properties, and Materials.* Segunda edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.

Neville, A. M. *Properties of Concrete.* Tercera edición. London: Pitman Books Ltd, 1981.

7



HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND

Los ingenieros civiles y de la construcción son directamente responsables del control de calidad del hormigón de cemento portland, así como de las proporciones de los componentes utilizados en él. La calidad del hormigón está determinada por la composición química del cemento portland, la hidratación y el desarrollo de la microestructura, los aditivos y las características del árido. La calidad también se ve afectada en gran medida por la colocación, la consolidación y el curado del hormigón.

La forma en que una estructura de hormigón responda durante su vida útil está bastante influida por los métodos utilizados para mezclar, transportar, colocar y curar el hormigón en la obra. De hecho, los ingredientes de un "buen" hormigón pueden ser idénticos a los de un hormigón "malo". La diferencia radica a menudo en la experiencia del ingeniero y de los técnicos que se encargan de manejar el hormigón durante la construcción.

Gracias a los avances realizados en la tecnología del hormigón en las últimas décadas, hoy día podemos emplear el hormigón en muchas más aplicaciones. Los ingenieros civiles y de la construcción deben ser conscientes de las alternativas existentes al hormigón convencional, como por ejemplo el hormigón ligero, el hormigón de alta resistencia, el hormigón polimérico, el hormigón reforzado con fibra y el hormigón compactado a rodillo. Sin embargo, antes de utilizar estas alternativas al hormigón convencional, el ingeniero debe estudiarlas en detalle, así como evaluar los costes asociados. Este capítulo cubre los principios básicos relativos al hormigón de cemento portland convencional, expone cómo determinar sus proporciones, cómo mezclarlo y manipularlo, cómo curarlo y realizar las pruebas necesarias. También se presenta una serie de alternativas al hor-

migón convencional que permiten incrementar el rango de aplicaciones y mejorar las características del material.

7.1 Proporciones para las mezclas de hormigón

Las propiedades del hormigón dependen de las proporciones de la mezcla y de los métodos de colocación y curado utilizados. Generalmente, los diseñadores especifican o asumen una cierta resistencia o módulo de elasticidad del hormigón a la hora de determinar las dimensiones estructurales. El ingeniero de materiales es responsable de garantizar que se utilice la mezcla apropiada para el hormigón y de que este se mezcle, se coloque y se cure de manera que exhiba las propiedades especificadas por el diseñador.

Las proporciones de la mezcla de hormigón afectan a sus propiedades, tanto en estado plástico como sólido. En el estado plástico, lo que preocupa al ingeniero de materiales es la facilidad de trabajar el hormigón y las características de acabado. Entre las propiedades del hormigón endurecido que tienen importancia para el ingeniero de materiales podemos citar la resistencia, el módulo de elasticidad, la durabilidad y la porosidad. El principal factor que controla el diseño suele ser la resistencia. A menos que se especifique otra cosa, la resistencia del hormigón, f'_c, hace referencia al valor promediado a lo largo de tres pruebas de la resistencia a la compresión. Cada una de las pruebas es, a su vez, el resultado de promediar las pruebas de compresión de dos cilindros de 0,15 m × 0,30 m (6 pulg. × 12 pulg.) después de haberlos curado durante 28 días.

La PCA especifica tres cualidades para decidir las mezclas de hormigón con las proporciones adecuadas (Kosmatka *et al.*, 2002):

1. Facilidad de trabajar el hormigón mezclado fresco.
2. Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del hormigón endurecido.
3. Economía.

Para conseguir estas características, el ingeniero de materiales tiene que determinar las proporciones de cemento, agua, áridos finos y gruesos, y la utilización de aditivos. Se han desarrollado diversos métodos de mezcla a lo largo de los años, que van desde un método arbitrario basado en el volumen (1:2:3 cemento: arena: árido grueso), hasta los métodos basados en peso y en el volumen absoluto prescritos por el Comité 211 del Instituto americano del hormigón (ACI). El método basado en el peso proporciona técnicas relativamente simples para determinar las proporciones de las mezclas, utilizando un peso específico conocido o supuesto del hormigón. El método basado en el volumen absoluto utiliza la gravedad específica de cada ingrediente para calcular el volumen unitario que cada uno de ellos ocupará dentro de una unidad de volumen de hormigón. El método del volumen absoluto es más preciso que el método basado en el peso. El proceso de diseño de la mezcla para los métodos basados en peso y en volumen absoluto solo difieren en la forma de determinar la cantidad de árido fino.

7.1.1 Pasos básicos para los métodos basados en el peso y en el volumen absoluto

Los pasos básicos requeridos para determinar las proporciones de diseño de la mezcla para los métodos basados en el peso y en el volumen absoluto son los siguientes (Kosmatka *et al.*, 2002):

1. Evaluar los requisitos de resistencia.
2. Determinar la relación agua–materiales cementosos requerida.
3. Evaluar las necesidades de árido grueso.
   - Tamaño máximo del árido grueso.
   - Cantidad de árido grueso.
4. Determinar los requisitos de aireación.
5. Evaluar los requisitos relativos a la facilidad de trabajar el hormigón plástico.
6. Estimar el contenido de agua requerido en la mezcla.
7. Determinar el contenido de materiales cementosos, así como su tipo.
8. Evaluar la necesidad y la velocidad de aplicación de aditivos.
9. Evaluar las necesidades de árido fino.
10. Determinar las correcciones de humedad necesarias.
11. Realizar y ensayar una serie de mezclas de prueba.

La mayoría de las empresas suministradoras de hormigón tienen una gran experiencia en lo relativo al comportamiento de sus materiales en diversas aplicaciones. Esta experiencia, complementada con datos de prueba fiables acerca de la relación existente entre la resistencia y el cociente agua–materiales cementosos, es el método más fiable para la determinación de las proporciones de la mezcla. Sin embargo, el comprender los principios básicos del diseño de mezclas y el proceso de selección de materiales y de las características de las mezclas es tan importante como los propios cálculos. Por tanto, el procedimiento establecido por la PCA proporciona una serie de directrices y puede ajustarse para adaptarlo a la experiencia obtenida a partir de las condiciones vigentes localmente. A continuación, se explican más en detalle los pasos de diseño de una mezcla identificados por la PCA.

1. Requisitos de resistencia Las variaciones en los materiales y en la dosificación y mezcla del hormigón provocan desviaciones en el grado de resistencia del hormigón producido en una planta de fabricación. Generalmente, el ingeniero de diseño de estructuras no tiene en cuenta esta variabilidad a la hora de determinar el tamaño de los elementos estructurales. Si el ingeniero de materiales proporciona un material con una resistencia media igual a la especificada por el diseñador, entonces la mitad del hormigón tendrá una resistencia inferior a la especificada. Obviamente, esta situación no es aceptable. Para compensar la variación en la resistencia del hormigón, el ingeniero de materiales diseña el hormigón de modo que tenga una resistencia media superior a la especificada por el ingeniero de estructuras.

Para calcular los requisitos de resistencia para el diseño de mezclas de hormigón, debemos conocer tres valores:

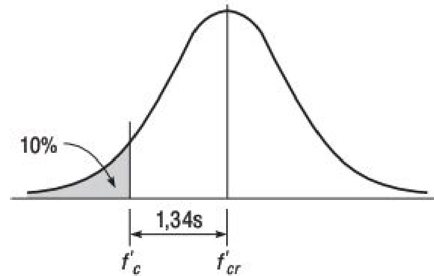


FIGURA 7.1 Uso de la distribución normal y de los criterios de riesgo para estimar la resistencia media requerida del hormigón.

1. La resistencia a la compresión especificada f'_c.
2. La variabilidad o desviación estándar s del hormigón.
3. El riesgo máximo admisible de fabricar hormigón con una resistencia inaceptable.

La desviación estándar de la resistencia se determina para una planta tomando una serie de lotes de hormigón, comprobando la resistencia de numerosas muestras y calculando la desviación estándar mediante la Ecuación 1.15 del Capítulo 1. El riesgo admisible está establecido por el Instituto americano del hormigón (ACI). Una de las reglas relativas al riesgo indica que debe existir una probabilidad del 10% de que la resistencia de una mezcla de hormigón sea inferior a la especificada. Asumiendo que la resistencia del hormigón tenga una distribución normal, la consecuencia de esa regla del ACI es que el 10% del área de la distribución debe estar situada a la izquierda de f'_c, como se muestra en la Figura 7.1. Utilizando una tabla de valores z estándar para una curva de distribución normal, podemos ver que el 90% del área situada bajo la curva estará a la derecha de f'_c si la resistencia media está a 1,34 desviaciones estándar de f'_c. En otras palabras, la resistencia media requerida f'_{cr} para este criterio puede calcularse mediante la fórmula:

$$f'_{cr} = f'_c + 1{,}34\ s \qquad (7.1)$$

donde

f'_{cr} = valor medio requerido de resistencia a la compresión, MPa o psi.
f'_c = resistencia a la compresión especificada, MPa o psi.
s = desviación estándar, MPa o psi.

Para mezclas con una gran desviación estándar de la resistencia, el ACI ha enunciado otro criterio de riesgo que establece que:

$$f'_{cr} = f'_c + 2{,}33\ s - 3{,}45 \qquad (7.2)$$

El valor medio requerido de resistencia a la compresión f'_{cr} se determina tomando el mayor de los valores obtenidos a partir de las Ecuaciones 7.1 y 7.2.

La Ecuación 7.2 solo es válida para las unidades del sistema internacional (SI). Si se emplean unidades americanas, f'_{cr}, f'_c y s se miden en psi y la constante 3,45 de la Ecuación 7.2 debe cambiarse por 500.

La desviación estándar debe determinarse utilizando al menos 30 pruebas de resistencia. Si la desviación estándar se calcula utilizando un número de muestras comprendido entre 15 y 30, entonces hay que multiplicarla por el siguiente factor, F, para determinar la desviación estándar modificada s'.

Número de pruebas	Factor de modificación F
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 o más	1,00

Para un número intermedio de pruebas, se utiliza una interpolación lineal; s' se usa en lugar de s en las Ecuaciones 7.1 y 7.2.

Si se han realizado menos de 15 pruebas, hay que aplicar los siguientes ajustes a la resistencia especificada, en lugar de emplear las Ecuaciones 7.1 y 7.2:

Resistencia a la compresión especificada f'_c, MPa (psi)	Valor medio requerido de resistencia a la compresión f'_{cr}, MPa (psi)
< 21 (< 3000)	$f'_c + 7{,}0$ ($f'_c + 1000$)
21 a 35 (3000 a 5000)	$f'_c + 8{,}5$ ($f'_c + 1200$)
> 35 (> 5000)	$f'_c + 10{,}0$ ($f'_c + 1400$)

Estas estimaciones son bastante conservadoras y no deben utilizarse para proyectos de gran envergadura, ya que se estaría sobredimensionando el hormigón y no resultaría, por tanto, económico.

Problema de ejemplo 7.1

El ingeniero de diseño especifica una resistencia del hormigón de 31,0 MPa (4.500 psi). Determine el valor medio requerido de resistencia a la compresión para

a. una nueva planta cuya s es desconocida.
b. una planta para la que s = 3,6 MPa (520 psi) para 17 resultados de prueba.
c. una planta de fabricación con un documentado historial de producción de hormigón con s = 2,4 MPa (350 psi)
d. una planta de fabricación con un documentado historial de producción de hormigón con s = 3,8 MPa (550 psi)

Solución

a. $f'_{cr} = f'_c + 8{,}5 = 31{,}0 + 8{,}5 = 39{,}5$ MPa (5700 psi)

b. Hace falta interpolar el factor de modificación:

$$F = 1{,}16 - \left(\frac{1{,}16 - 1{,}08}{20 - 15}\right)(17 - 15) \cong 1{,}13$$

Multiplicamos la desviación estándar por el factor de modificación:

$$s' = (s)(F) = 3{,}6\ (1{,}13) = 4{,}1 \text{ MPa } (590 \text{ psi})$$

Determinamos el máximo a partir de las Ecuaciones 7.1 y 7.2

$$f'_{cr} = 31{,}0 + 1{,}34(4{,}1) = 36{,}5 \text{ MPa } (5300 \text{ psi})$$
$$f'_{cr} = 31{,}0 + 2{,}33(4{,}1) - 3{,}45 = 37{,}1 \text{ MPa } (5390 \text{ psi})$$
$$\text{Utilizamos } f'_{cr} = 37{,}1 \text{ MPa } (5390 \text{ psi})$$

c. Determinamos el máximo a partir de las Ecuaciones 7.1 y 7.2

$$f'_{cr} = 31{,}0 + 1{,}34(2{,}4) = 34{,}2 \text{ MPa } (4970 \text{ psi})$$
$$f'_{cr} = 31{,}0 + 2{,}33(2{,}4) - 3{,}45 = 33{,}1 \text{ MPa } (4810 \text{ psi})$$
$$\text{Utilizamos } f'_{cr} = 34{,}2 \text{ MPa } (4970 \text{ psi})$$

d. Determinamos el máximo a partir de las Ecuaciones 7.1 y 7.2

$$f'_{cr} = 31{,}0 + 1{,}34(3{,}8) = 36{,}1 \text{ MPa } (5240 \text{ psi})$$
$$f'_{cr} = 31{,}0 + 2{,}33(3{,}8) - 3{,}45 = 36{,}4 \text{ MPa } (5280 \text{ psi})$$
$$\text{Utilizamos } f'_{cr} = 36{,}4 \text{ MPa } (5280 \text{ psi})$$

2. Relación agua–materiales cementosos El siguiente paso consiste en determinar la relación agua–materiales cementosos necesaria para obtener la resistencia requerida. Se utilizan registros históricos para dibujar una curva de la resistencia en función de la relación agua–materiales cementosos, como la mostrada en la Figura 7.2. Si no hay disponibles datos históricos, se fabrican tres lotes con diferentes relaciones agua–materiales cementosos para construir una curva similar a la de la Figura 7.2. Cuando no haya otros datos disponibles, puede utilizarse la Tabla 7.1 para estimar las relaciones agua–materiales cementosos de las mezclas de prueba. Se emplea el valor medio requerido de resistencia a la compresión, junto con la curva de resistencia en función de la relación agua–materiales cementosos, para determinar la relación agua–materiales cementosos requerida para satisfacer los requisitos de resistencia del proyecto.

Para pequeños proyectos o aplicaciones no críticas, puede emplearse la Tabla 7.2 en lugar de las mezclas de prueba, siempre con el permiso del ingeniero de proyectos. La Tabla 7.2 es conservadora en lo que respecta a la dependencia entre la resistencia y la relación agua–materiales cementosos. Esto da como resultado una proporción de cemento más alta y una resistencia media mayor que la que se obtendría si se realizara un diseño de la mezcla por el procedimiento convencional. Esta tabla no debe usarse para diseñar lotes de prueba; para ese propósito utilice la Tabla 7.1.

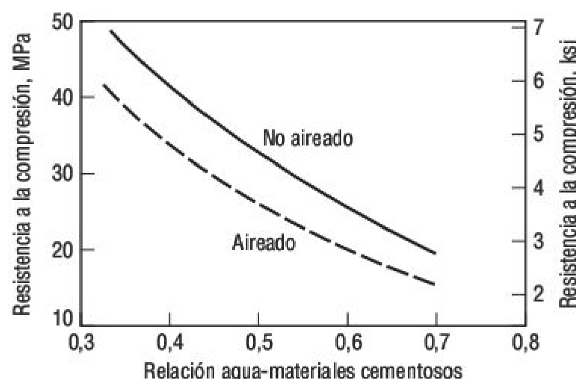


FIGURA 7.2 Curvas de resistencia para una mezcla de prueba o para datos históricos.

La relación agua–materiales cementosos necesaria para obtener la resistencia especificada se compara con la relación agua–materiales cementosos máxima admisible, para las condiciones de exposición del hormigón. Las Tablas 7.3 y 7.4 proporcionan directrices relativas a la relación agua–materiales cementosos máxima admisible y al valor mínimo de diseño de la resistencia a la compresión para diversas condiciones de exposición. Generalmente, cuanto más severas sean las condiciones de exposición, menor tendrá que ser la relación agua–materiales cementosos. Para calcular las proporciones del hormigón, se selecciona el valor mínimo de la relación agua–materiales cementosos, teniendo en cuenta tanto las condiciones de resistencia como las de exposición.

TABLA 7.1 Dependencia típica entre la relación agua–materiales cementosos y la resistencia a la compresión del hormigón*

	Relación agua–materiales cementosos en peso	
Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa (psi)**	**Hormigón no aireado**	**Hormigón aireado**
48 (7000)	0,33	—
41 (6000)	0,41	0,32
35 (5000)	0,48	0,40
28 (4000)	0,57	0,48
21 (3000)	0,68	0,59
14 (2000)	0,82	0,74

*Instituto americano del hormigón (ACI 211.1 y ACI 211.3)

**La resistencia está basada en pruebas con cilindros curados durante 28 días de acuerdo con la ASTM C31 (AASHTO T23). La relación presupone un tamaño máximo nominal del árido de entre 19 y 25 mm (3/4 a 1 pulgada).

TABLA 7.2 Relación agua–materiales cementosos máxima admisible para el hormigón cuando no hay disponibles datos históricos de resistencia ni mezclas de ejemplo.*

Resistencia a la compresión especificada a los 28 días, f'_c, MPa (psi)	Relación agua–materiales cementosos en peso	
	Hormigón no aireado	Hormigón aireado
17 (2.500)	0,67	0,54
21 (3.000)	0,58	0,46
24 (3.500)	0,51	0,40
28 (4.000)	0,44	0,35
31 (4.500)	0,38	**
35 (5.000)	**	**

*Instituto americano del hormigón (ACI 318), 1999.

**Para resistencias por encima de 31,0 MPa (4500 psi) (hormigón no aireado) y 27,6 MPa (4000 psi) (hormigón aireado), las proporciones del hormigón deben establecerse a partir de datos históricos o mezclas de prueba.

TABLA 7.3 Relaciones máximas agua–materiales cementosos y valores mínimos de diseño de la resistencia para diversas condiciones de exposición.*

Condiciones de exposición	Relación máxima agua–materiales cementosos según masa de hormigón	Valor mínimo de diseño de la resistencia a la , compresión f'_c, MPa (psi)
Hormigón protegido frente a la exposición a la congelación y la descongelación, frente a la aplicación de sustancias químicas descongelantes o sustancias agresivas.	Seleccione la relación agua–materiales cementosos en función de la resistencia, de la facilidad de trabajar el hormigón y de las necesidades de acabado.	Seleccione la resistencia basándose en los requisitos estructurales
Hormigón con baja permeabilidad al ser expuesto al agua.	0,50	28 (4.000)
Hormigón expuesto a la congelación y la descongelación en ambiente húmedo, o expuesto a anticongelantes.	0,45	31 (4.500)
Para protección frente a la corrosión del hormigón armado expuesto a cloruros de sales descongelantes, agua salobre, agua marina o salpicaduras procedentes de esas fuentes.	0,40	35 (5.000)

*Instituto americano del hormigón (ACI 318), 1999.

TABLA 7.4 Requisitos para el hormigón expuesto a sulfatos en tierra o en agua.*

Exposición a sulfatos	Sulfato soluble en agua (SO_4) en tierra, porcentaje en peso**	Sulfato (SO_4) en agua, ppm**	Tipo de cemento***	Relación agua–materiales cementosos en peso	Valor mínimo de resistencia a la compresión, f'_c, MPa (psi)
Despreciable	Menos de 0,10	Menos de 150	No se requiere ningún tipo especial	—	—
Moderada****	0,10–0,20	150–1.500	II, MS, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0,50	28 (4.000)
Severa	0,20–2,00	1.500–10.000	V, HS	0,45	31 (4.500)
Muy severa	Más de 2,00	Más de 10.000	V, HS	0,40	35 (5.000)

*Según el Instituto americano del hormigón (ACI 318), 1999.

**Probado de acuerdo con el Método de determinación de la cantidad de sulfato soluble en muestras sólidas (suelos y rocas) y de agua, Oficina de reclamaciones, Denver, 1977.

***Los cementos de Tipo II y V están en ASTM C150 (AASHTO M85), los Tipos MS y HS en ASTM C1157 y los tipos restantes están en ASTM C595 (AASHTO M240). También pueden utilizarse, para mejorar la resistencia a los sulfatos, puzolanas o escorias que hayan sido validadas mediante pruebas o datos históricos.

****Agua de mar.

Si se usa una puzolana en el hormigón, puede utilizarse la relación agua–materiales cementosos más puzolana, en lugar de la relación tradicional agua–materiales cementosos. En otras palabras, el peso del agua se divide entre la suma de los pesos del cemento y de la puzolana.

3. Necesidades de árido grueso El siguiente paso consiste en determinar las características de árido adecuadas para el proyecto. En general, los áridos de granulometría mayor y más densa proporcionan las mezclas más económicas. Los áridos de gran tamaño minimizan la cantidad de agua requerida y reducen, por tanto, la cantidad de cemento necesaria por cada metro cúbico de mezcla. Los áridos redondeados requieren menos agua que los áridos angulares para mantener una facilidad de trabajo del hormigón constante.

El tamaño máximo admisible del árido está limitado por las dimensiones de la estructura y por las capacidades de los equipos de construcción utilizados. Debe usarse el tamaño máximo de árido que resulte práctico, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo, y que también satisfaga los límites de tamaño indicados en la siguiente tabla:

Situación	Tamaño máximo del árido
Dimensiones del encofrado	1/5 de la distancia de separación mínima
Separación entre elementos de la armadura o tendones de pretensado	3/4 de la distancia de separación mínima
Separación entre armadura y encofrado	3/4 de la distancia de separación mínima
Losa sin armadura	1/3 del espesor

Problema de ejemplo 7.2

Se desea construir una estructura de hormigón con una dimensión mínima de 0,2 m, un espacio mínimo entre las barras de armadura de 40 mm y un recubrimiento mínimo de las barras de armadura de 40 mm. Localmente, hay disponibles dos tipos de árido, con tamaños máximos de 19 mm y 25 mm, respectivamente. Si ambos tipos de áridos tienen prácticamente el mismo coste, ¿cuál de ellos es más adecuado para esta estructura?

Solución

25 mm < (1/5) (200 mm) dimensiones mínimas.

25 mm < (3/4) (40 mm) separación entre barras de armadura.

25 mm < (3/4) (40 mm) recubrimiento de las barras de armadura.

Ambos tamaños satisfacen los requisitos relativos a las dimensiones. Sin embargo, el árido de 25 mm es más adecuado, porque permitirá una mezcla de hormigón más económica.

■

La granularidad de los áridos finos está definida por el módulo de finura. El módulo de finura deseable dependerá del tamaño del árido grueso y de la cantidad de pasta de cemento. Para las mezclas con un bajo contenido en cemento, es aconsejable utilizar un módulo de finura bajo, con el fin de mejorar la facilidad de trabajar la mezcla.

Una vez determinado el módulo de finura del árido fino y el tamaño máximo del árido grueso, se calcula el volumen de árido grueso por unidad de volumen del hormigón, utilizando la Tabla 7.5. Por ejemplo, si el módulo de finura del árido fino es 2,60 y el tamaño máximo de árido es 25 mm (1 pulgada), el árido grueso tendrá un volumen de 0,69 m^3/m^3 ($yarda^3/yarda^3$) de hormigón. La Tabla 7.5 está basada en el peso específico de los áridos apisonados en seco (ASTM C29). Los valores proporcionados están basados en la experiencia a la hora de conseguir un determinado valor promedio en la facilidad de trabajo con el hormigón. El volumen del árido grueso puede incrementarse en un 10% cuando haga falta una menor facilidad de trabajo del hormigón, como por ejemplo en la construcción de pavimentos. El volumen del árido grueso debe reducirse en un 10% si se quiere aumentar la facilidad de trabajo del hormigón, por ejemplo para permitir la colocación del mismo por el procedimiento de bombeo.

TABLA 7.5 Volumen de árido grueso por unidad de volumen de hormigón.*

Tamaño nominal máximo de árido, mm (pulgadas)	Volumen de árido grueso apisonado en seco por unidad de volumen de hormigón, para diferentes módulos de finura del árido fino**			
	Módulo de finura			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5 (3/8)	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5 (1/2)	0,59	0,57	0,55	0,53
19 (3/4)	0,66	0,64	0,62	0,60
25 (1)	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5 (1 1/2)	0,75	0,73	0,71	0,69
50 (2)	0,78	0,76	0,74	0,72
75 (3)	0,82	0,80	0,78	0,76
150 (6)	0,87	0,85	0,83	0,81

*Instituto americano del hormigón (ACI 211.1).

**Los volúmenes están basados en áridos apisonados en seco, según se describe en ASTM C29 (AASHTO T19).

4. Necesidades de aireación A continuación, hay que evaluar las necesidades de aireación del hormigón. La aireación es necesaria siempre que el hormigón vaya a estar expuesto a condiciones de congelación y descongelación y a la acción de sales anticongelantes. La aireación también se emplea para mejorar la facilidad de trabajo en algunas situaciones. La cantidad de aire requerida varía dependiendo de las condiciones de exposición y se ve afectada por el tamaño de los áridos. Los niveles de exposición se definen como sigue:

Exposición pequeña: instalación en interiores o exteriores en la que el hormigón no esté expuesto a la congelación y a la acción de sales anticongelantes. La aireación puede mejorar la facilidad de trabajo con el hormigón.

Exposición moderada: existe algo de exposición a la congelación, pero el hormigón no está expuesto a la humedad o al agua durante largos periodos antes de la congelación. El hormigón no está expuesto a la acción de sales anticongelantes. Entre los ejemplos podríamos citar vigas, pilares, muros, etc. no expuestos al contacto con un suelo húmedo.

Exposición severa: el hormigón está expuesto a la acción de sales anticongelantes, a la saturación o al agua. Como ejemplos podríamos incluir los pavimentos, cubiertas de puentes, bordillos, canalones, revestimientos de canales, etc.

La Tabla 7.6 presenta el contenido de aire recomendado para diferentes combinaciones de condiciones de exposición y tamaño máximo del árido. Los valores mos-

TABLA 7.6 Requisitos aproximados de contenido porcentual de aire para diferentes tamaños máximos nominales del árido.*

	Tamaño máximo del árido							
	9,5 mm (3/8")	12,5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37,5 mm (1-1/2")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")
Hormigón no aireado	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Hormigón aireado**								
Exposición pequeña	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Exposición moderada	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
Exposición severa	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

*Instituto americano del hormigón (ACI 211.1 y ACI 318).

**El contenido de aire en el diseño del proyecto debe especificarse con un error de entre −1 al +2 por ciento del objetivo marcado en la tabla para exposiciones moderadas y severas.

trados en esta tabla son el aire atrapado, para el hormigón no aireado, y el aire atrapado más el de aireación en el caso de hormigón aireado. El contenido de aire recomendado se reduce al incrementarse el tamaño máximo del árido.

5. Facilidad de trabajo con el hormigón El siguiente paso en el diseño de la mezcla consiste en determinar los requisitos relativos a la facilidad de trabajo con el hormigón dentro del proyecto. La trabajabilidad se define como la facilidad de colocación, consolidación y acabado del hormigón mezclado fresco. Debe poderse trabajar fácilmente con el hormigón, pero no debe segregarse ni exudar de manera excesiva (migración del agua hacia la superficie superior del hormigón). La prueba de asentamiento (Figura 7.3) es



FIGURA 7.3 Aparato para la prueba de asentamiento.

TABLA 7.7 Grado de asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción.*

Construcción de hormigón	Asentamiento, mm (pulgada)	
	Máximo**	**Mínimo**
Lechos y muros de cimentación con hormigón armado	75 (3)	25 (1)
Lechos normales, cajones de aire comprimido y muros de infraestructuras	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros de hormigón armado	100 (4)	25 (1)
Pilares de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas	75 (3)	25 (1)
Hormigón en masa	75 (3)	25 (1)

*Instituto americano del hormigón (ACI 211.1).

**Puede incrementarse 25 mm (1 pulgada) para consolidación por métodos manuales, tales como el apisonado con pala o con varillas. Se pueden usar también plastificantes para aumentar de manera segura el grado de asentamiento.

un indicador de la facilidad de trabajo con el hormigón a la hora de evaluar mezclas similares. Esta prueba consiste en rellenar un cono truncado de hormigón, quitar el cono y luego medir la distancia que el hormigón alcanza al asentarse (ASTM C143). El grado de asentamiento se incrementa añadiendo agua, un agente de aireación, un reductor de agua, un superplastificante o utilizando áridos redondeados. La Tabla 7.7 proporciona recomendaciones relativas al asentamiento del hormigón empleado en distintos tipos de proyectos. Para ajustar la dosificación, el grado de asentamiento se incrementa unos 25 mm (1 pulgada) por cada 6 kg de agua que se añadan por m^3 (10 libras por yarda cúbica) de hormigón.

6. Contenido de agua requerido El contenido de agua requerido para un cierto grado de asentamiento depende de la forma y del tamaño máximo de los áridos y de si se utiliza un agente de aireación. La Tabla 7.8 detalla los requisitos aproximados de agua de mezcla para áridos gruesos angulares (piedra triturada). Las recomendaciones de la Tabla 7.8 deben reducirse para otras formas de áridos como se indica en la tabla siguiente.

Forma del árido	Reducción en el contenido de agua, kg/m^3 (libra/yd^3)
Subangular	12 (20)
Grava con partículas trituradas	21 (35)
Grava redondeada	27 (45)

Estas recomendaciones son aproximadas y deben verificarse utilizando lotes de prueba con los materiales locales.

TABLA 7.8 Agua aproximada de mezcla en in kg/m^3 (lb/yd^3) para diferentes grados de asentamiento y tamaños máximos nominales de árido.*

Asentamiento, mm (pulgadas)	Tamaño máximo del árido en mm (in.)** 9,5 (3/8)	12,5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37,5 (1-1/2)	50 (2)***	75 (3)***	150 (6)***
Hormigón no aireado								
25 a 50 (1 to 2)	207 (350)	199 (335)	190 (315)	179 (300)	166 (275)	154 (260)	130 (220)	113 (190)
75 a 100 (3 a 4)	228 (385)	216 (365)	205 (340)	193 (325)	181 (300)	169 (285)	145 (245)	124 (210)
150 a 175 (6 a 7)	243 (410)	228 (385)	216 (360)	202 (340)	190 (315)	178 (300)	160 (270)	—
Hormigón aireado								
25 a 50 (1 a 2)	181 (305)	175 (295)	168 (280)	160 (270)	150 (250)	142 (240)	122 (205)	107 (180)
75 a 100 (3 a 4)	202 (340)	193 (325)	184 (305)	175 (295)	165 (275)	157 (265)	133 (225)	119 (200)
150 a 175 (6 a 7)	216 (365)	205 (345)	197 (325)	184 (310)	174 (290)	166 (280)	154 (260)	—

*Instituto americano del hormigón (ACI 211.1 y ACI 318).

**Estas cantidades de agua de la mezcla son para utilizarlas a la hora de calcular el contenido de materiales cementosos de los lotes de prueba. Son valores máximos para áridos gruesos angulares razonablemente bien formados y cuya granulometría se encuentre dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.

***Los valores de asentamiento para hormigón con áridos mayores que 37,5 mm (1-1/2) están basados en priebas de aentamiento hechas después de eliminar las partículas de tamaño mayor que 37,5 mm mediante una criba húmeda.

TABLA 7.9 Necesidades mínimas de los materiales cementosos para el hormigón utilizado en piezas planas*

Tamaño máximo del árido, mm (pulgadas)	Materiales cementosos kg/m^3 (libra/yd^3)**
37,5 (1-1/2)	280 (470)
25,0 (1)	310 (520)
19,0 (3/4)	320 (540)
12,5 (1/2)	350 (590)
9,5 (3/8)	360 (610)

*Instituto americano del hormigón (ACI 302).

**Las cantidades de materiales cementosos pueden tener que incrementarse para grados de exposición severa. Por ejemplo, para una exposición a los anticongelantes, el hormigón debe contener al menos 335 kg/m^3 (564 libra/yd^3) de materiales cementosos.

7. Contenido de materiales cementosos requerido Utilizando la relación agua–materiales cementosos y la cantidad requerida de agua estimada, se determina la cantidad de materiales cementosos requerida para la mezcla dividiendo el peso del agua entre la relación agua–materiales cementosos. La PCA recomienda un contenido mínimo de cemento de 334 kg/m^3 (564 libras/yd^3) para el hormigón expuesto a ciclos severos de congelación–descongelación, a la acción de anticongelantes y al sulfato, y no menos de 385 kg/m^3 (650 libras/yd^3) para el hormigón colocado bajo el agua. Además, la Tabla 7.9 muestra las necesidades mínimas de cemento para una adecuada colocación, acabado, resistencia a la abrasión y durabilidad en las piezas planas, como por ejemplo, las losas de hormigón.

8. Necesidades de aditivos Si se emplean uno o más aditivos para proporcionar una calidad específica al hormigón (como se ha explicado en el Capítulo 6), es preciso tener en cuenta sus correspondientes cantidades a la hora de establecer las proporciones de la mezcla. Los fabricantes de aditivos proporcionan información específica sobre la cantidad de aditivo necesaria para conseguir los resultados deseados.

9. Necesidades de árido fino Llegados a este punto, ya conocemos los pesos de agua, de cemento y de árido grueso por metro cúbico (yarda cúbica), también hemos estimado el volumen de aire. El único factor que queda por calcular es la cantidad de árido fino necesaria. El método de diseño de la mezcla basada en el peso utiliza la Tabla 7.10 para estimar el peso total de un hormigón mezclado fresco "típico" para diferentes tamaños de árido. El peso de los áridos finos se determina restando el peso de los demás ingredientes del peso total. Puesto que la Tabla 7.10 está basada en una mezcla "típica", el método de diseño basado en peso es aproximado.

En el método de diseño de mezclas basado en el volumen absoluto, se utilizan el peso de los componentes y la gravedad específica para determinar los volúmenes del

TABLA 7.10 Estimación de pesos del hormigón mezclado fresco.

Tamaño máximo de árido mm (pulgada)	Hormigón no aireado kg/m^3 (libra/yd^3)	Hormigón aireado kg/m^3 (libra/yd^3)
9,5 (3/8)	2.276 (3.840)	2.187 (3.690)
12,5 (1/2)	2.305 (3.890)	2.228 (3.760)
19,0 (3/4)	2.347 (3.960)	2.276 (3.840)
25,0 (1)	2.376 (4.010)	2.311 (3.900)
37,5 (1-1/2)	2.412 (4.070)	2.347 (3.960)
50,0 (2)	2.441 (4.120)	2.370 (4.000)
75,0 (3)	2.465 (4.160)	2.394 (4.040)
150 (6)	2.507 (4.230)	2.441 (4.120)

agua, del árido grueso y del cemento. Estos volúmenes, junto con el volumen del aire se restan de un volumen unitario de hormigón para determinar el volumen de árido fino requerido. A continuación, el volumen de árido fino se convierte a un peso utilizando el peso específico. Generalmente, se emplea la gravedad específica en estado SSD para realizar las conversiones peso–volumen tanto de los áridos finos como de los gruesos.

10. Correcciones de la humedad El diseño de mezclas presupone que el agua utilizada para hidratar el cemento es el agua libre que excede del contenido de humedad de los áridos en condiciones SSD (absorción), como se explica en el Capítulo 5. Por tanto, el paso final en el proceso de diseño de mezclas consiste en ajustar el peso del agua y de los áridos para tener en cuenta el contenido de humedad de los áridos. Si este contenido de humedad es mayor que el grado de humedad en el estado SSD, habrá que reducir el peso del agua de mezcla en una cantidad igual al peso libre de humedad existente en los áridos. De forma similar, si el grado de humedad está por debajo del correspondiente al estado SSD, habrá que incrementar la cantidad de agua de la mezcla.

11. Mezclas de prueba Después de calcular las cantidades requeridas de cada ingrediente, se realiza la mezcla de un lote de prueba para comprobar el diseño de la mezcla. Se fabrican tres cilindros de 0,15 m × 0,30 m (6 pulg. × 12 pulg.), se curan durante 28 días y se prueban para determinar su resistencia a la compresión. Además, se mide el contenido de aire y el grado de asentamiento del hormigón fresco. Si el asentamiento, el contenido de aire o la resistencia a la compresión no cumplen los requisitos establecidos, será necesario ajustar la mezcla y fabricar otros lotes de prueba hasta que se satisfagan completamente los requisitos de diseño.

Pueden fabricarse lotes de prueba adicionales variando ligeramente las cantidades de los materiales, con el fin de determinar la mezcla más económica y que presente una mayor facilidad de trabajo.

Problema de ejemplo 7.3

Se está trabajando en el diseño de una mezcla de hormigón que requiere que cada yarda cúbica de hormigón tenga una relación agua–materiales cementosos igual a 0,43; 2077 libras/yd^3 de grava seca, 244 libras/yd^3 de agua y un 4% de contenido de aire. La grava disponible tiene una gravedad específica de G_{grava} = 2,6, un grado de humedad del 2,3% y una absorción del 4,5%. La arena disponible tiene una gravedad específica de G_{arena} = 2,4, un grado de humedad del 2,2% y una absorción del 1,7%. Hay que incluir un agente de aireación utilizando la especificación del fabricante que indica que hay que emplear 0,1 onzas líq. / 1% aire / 100 libras de cemento.

Para cada yarda cúbica de hormigón necesaria en la obra, calcule el peso del cemento, de la grava húmeda, de la arena húmeda y del agua que hay que añadir al lote. Realice un resumen y especifique los valores totales para el diseño de la mezcla una vez que haya acabado.

Solución

Paso 7: $P_{cemento} = 244/0{,}43 = 567$ libras/yd^3

Paso 8: agente de aireación = (0,1) (4) (567/100) = 2,27 onzas liq.

Paso 9: $\gamma_w = 62{,}4$ libras/pie^3 (3 pie/yd)^3 = 1684,8 libras/yd^3

$V_{cemento} = 567{,}4 / (3{,}15 \times 1684{,}8)$	$= 0{,}107$ yd^3
$V_{agua} = 244 / 1684{,}8$	$= 0{,}145$ yd^3
$V_{grava} = 2077 / (2{,}6 \times 1684{,}8)$	$= 0{,}474$ yd^3
$V_{aire} = 4\%$	$= 0{,}040$ yd^3
Subtotal	$= 0{,}766$ yd^3

$V_{arena} = 1 - 0{,}766 = 0{,}234$ yd^3

$m_{arena} = (0{,}234)\ (2{,}4)\ (1684{,}8) = 946$ libras/yd^3

Paso 10: agua de mezcla = 244 − 2077 (0,023 − 0,045) − 946,2 (0,022 − 0,017) = 285 libras/yd^3

grava húmeda = 2077(1,023)	= 2125 libras/yd^3
arena húmeda = 946,2 (1,022)	= 967 librasyd^3
cemento	= 567 libras/yd^3
agente de aireación	= 2,27 onzas líq.

Problema de ejemplo 7.4

Diseñe una mezcla de hormigón para las siguientes condiciones y restricciones utilizando el método basado en el volumen absoluto:

Entorno de diseño

Pilar de un puente expuesto a congelación y sujeto a la acción de productos químicos anticongelantes.

Resistencia de diseño requerida = 24,1 MPa (3500 psi)
Dimensión mínima = 0,3 m (12 pulgadas)
Espacio mínimo entre barras de armadura = 50 mm (2 pulgadas)
Recubrimiento mínimo sobre barras de armadura = 40 mm (1,5 pulgadas)
Se espera una desviación estándar de la resistencia a la compresión de 2,4 MPa (350 psi) (más de 30 muestras) .
Sólo se permite utilizar un agente de aireación.

Materiales disponibles
Cemento
Seleccione el Tipo V debido a las condiciones de exposición.
Aireación
Especificación del fabricante: 6,3 ml/1% aire/100 kg de cemento (0,1 onza líq. /1% aire/100 libras de cemento)
Árido grueso
25 mm (1 pulgada) tamaño máximo, grava de río (redondeada).
Gravedad específica en estado seco = 2,621; absorción = 0,4%
Densidad del árido apisonado en seco = 1681 kg/m^3 (105 pcf)
Contenido de humedad = 1,5%
Árido fino
Arena natural
Gravedad específica en estado seco = 2,572; absorción = 0,8%
Contenido de humedad = 4%
Módulo de finura = 2,60

Solución

1. Requisitos de resistencia

$s = 2{,}4$ MPa (350 psi) (hay muestras suficientes por lo que no hace falta ninguna corrección)
$f'_{cr} = f'_c + 1{,}34s = 24{,}1 + 1{,}34\ (2{,}4) = 27{,}3$ MPa (3960 psi)
$f'_{cr} = f'_c + 2{,}33s - 3{,}45 = 24{,}1 + 2{,}33\ (2{,}4) - 3{,}45 = 26{,}2$ MPa (3810 psi)

$f'_{cr} = 27{,}3$ MPa (3960 psi)

2. Relación agua–materiales cementosos
Requisitos de resistencia (Tabla 7.1), relación agua–materiales cementosos = 0,48 por interpolación
Requisitos de exposición (Tablas 7.3 y 7.4), relación máxima agua–materiales cementosos = 0,45

Relación agua-materiales cementosos = 0,45

3. Necesidades de árido grueso

$$25 \text{ mm} < \frac{1}{5}(300 \text{ mm}) \text{ dimensiones mínimas}$$

$$25 \text{ mm} < \frac{3}{4}(50 \text{ mm}) \text{ espaciado de las barras de armadura}$$

$$25 \text{ mm} < \frac{3}{4}(40 \text{ mm}) \text{ recubrimiento de las barras de armadura}$$

Tamaño de árido correcto según las dimensiones

(Tabla 7.5) Tamaño máximo de árido grueso 25 mm y árido fino con módulo de finura de 2,60.
Factor del árido grueso = 0,69
Peso seco del árido grueso = (1681) (0,69) = 1160 kg/m^3 (1956 libras/yd^3)

Árido grueso = 1160 kg/m^3 (1956 libras/yd^3)

4. Contenido de aire
(Tabla 7.6) Exposición severa, contenido de aire deseado = 6,0%
Rango aceptable para el proyecto = 5% a 8% base

Diseño utilizando 7%

5. Facilidad de trabajo con el hormigón
(Tabla 7.7) El pilar del puente encaja mejor con los requisitos de la tabla relativos a los pilares.
Rango de asentamiento = 25 a 100 mm (1 a 4 pulgadas)

Utilice 75 mm (3 pulgadas)

6. Contenido de agua
(Tabla 7.8) Árido de 25 mm sometido a aireación y con un grado de asentamiento de 75 mm.
Agua = 175 kg/m^3 (295 libras/yd^3) para áridos angulares. Puesto que tenemos áridos gruesos redondeados, habrá que reducir en 27 kg/m^3 (45 libras/yd^3)

Agua requerida = 148 kg/m^3 (250 libra/yd^3)

7. Contenido de materiales cementosos
Relación agua–materiales cementosos = 0,45; agua = 148 kg/m^3 (250 libras/yd^3)
Cemento = 148/0,45 = 329 kg/m^3 (556 libras/yd^3)
Hay que incrementar para aplicar el criterio mínimo de 334 kg/m^3 (564 libras/yd^3) debido a las condiciones de exposición.

Cemento = 334 kg/m^3 (564 libra/yd^3)

8. Aditivo
7% aire, cemento = 334 kg/m^3 (564 libras/yd^3)
Aditivo = (6,3) (7) (334/100) = 147 ml/m^3 (3,9 onzas líq./yd^3)

Aditivo = 147 ml/m^3 (3,9 onzas liq./yd^3)

9. Necesidades de árido fino
El contenido de árido fino se calcula mediante el método basado en el volumen absoluto.
Volumen de agua = 148/(1 × 1000) = 0,148 m^3/m^3 (4,006 pie^3/yd^3)
Volumen de cemento = 334/(3,15 × 1000) = 0,106 m^3/m^3 (2,869 pie^3/yd^3)
Volumen de aire = 0,07 m^3/m^3 (0,07 × 27 = 1,890 pie^3/yd^3)
Volumen de árido grueso = 1160/(2,621 × 1000) = 0,443 m^3/m^3 (11,960 pie^3/yd^3)
Subtotal volumen = 0,767 m^3/m^3 (20,725 pie^3/yd^3)
Volumen de árido fino = 1 − 0,767 = 0,233 m^3/m^3 (27 − 20,725 = 6,275 pie^3/yd^3)
Peso seco del árido fino = (0,233) (2,572) (1000) = 599 kg/m^3 (1007 libras/yd^3)

Árido fino = 599 kg/m^3 (1007 libra/yd^3)

10. Corrección de la humedad
Árido grueso: se necesitan 1160 kg/m^3 (1956 libras/yd^3) en condición seca, por lo que habrá que incrementar en un 1,5% por la humedad.
Árido grueso húmedo = (1160) (1,015) = 1177 kg/m^3 (1985 libras/yd^3)
Árido fino: se necesitan 599 kg/m^3 (1007 libras/yd^3) en condición seca, por lo que habrá que incrementar en un 4% por la humedad.

Árido fino en condición húmeda = (599) (1,04) = 623 kg/m^3 (1047 libras/yd^3)

Agua: reducir para tener en cuenta el agua libre en los áridos =
148 − 1160 (0,015 − 0,004) − 599 (0,04 − 0,008) = 116 kg/m^3 (196 libras/yd^3)

Resumen

	Ingredientes requeridos para el lote	
	1 m^3 PCC	**1 yd^3 PCC**
Agua	116 kg	196 libras
Cemento	334 kg	564 libras
Árido fino	623 kg	1047 libras
Árido grueso	1177 kg	1985 libras
Aditivo	147 ml	3,9 onzas lq.

■

7.1.2 Mezclas de hormigón para proyectos de pequeña envergadura

El proceso de diseño de la mezcla se aplica a los grandes proyectos. En el caso de proyectos de poca envergadura en los que no resulte económico realizar un gran esfuerzo de diseño (por ejemplo, proyectos que requieran menos de un metro cúbico de hormigón), pueden utilizarse como guía las Tablas 7.11 y 7.12. Es posible que sea necesario ajustar los valores de estas tablas para obtener una mezcla fácilmente trabajable

TABLA 7.11 Cantidad relativa de componentes del hormigón para proyectos de poca envergadura, en peso.*

Tamaño máximo del árido grueso mm (pulg.)	Hormigón aireado				Hormigón no aireado			
	Cemento	Árido fino húmedo	Árido grueso húmedo**	Agua	Cemento	Árido fino húmedo	Árido grueso húmedo**	Agua
9,5 (3/8)	0,210	0,384	0,333	0,073	0,200	0,407	0,317	0,076
12,5 (1/2)	0,195	0,333	0,399	0,073	0,185	0,363	0,377	0,075
19 (3/4)	0,176	0,296	0,458	0,070	0,170	0,320	0,442	0,068
25 (1)	0,169	0,275	0,493	0,063	0,161	0,302	0,470	0,067
37,5 (1-1/2)	0,159	0,262	0,517	0,062	0,153	0,287	0,500	0,060

*Asociación del cemento portland (PCA), 2002.

**Si utiliza piedra triturada, reduzca el árido grueso en 50 kg e incremente el árido fino en 50 kg por cada metro cúbico de hormigón (o reduzca el árido grueso en 3 libras y aumente el árido fino en 3 libras por cada pie cúbico de hormigón).

TABLA 7.12 Cantidades relativas de componentes del hormigón para proyectos de poca envergadura, en volumen.*

Tamaño máximo del árido grueso mm (pulg.)	Hormigón aireado				Hormigón no aireado			
	Cemento	Árido fino húmedo	Árido grueso húmedo	Agua	Cemento	Árido fino húmedo	Árido grueso húmedo	Agua
9,5 (3/8)	0,190	0,429	0,286	0,095	0,182	0,455	0,272	0,091
12,5 (1/2)	0,174	0,391	0,348	0,087	0,167	0,417	0,333	0,083
19 (3/4)	0,160	0,360	0,400	0,080	0,153	0,385	0,385	0,077
25 (1)	0,154	0,346	0,423	0,077	0,148	0,370	0,408	0,074
37,5(1-1/2)	0,148	0,333	0,445	0,074	0,143	0,357	0,429	0,071

*Asociación de cemento portland (PCA), 2002.
El volumen combinado es aproximadamente 2/3 de la suma de los volúmenes originales de los componentes.

empleando los áridos localmente disponibles. También es preciso seguir las recomendaciones anteriormente señaladas relativas a las condiciones de exposición.

Las Tablas 7.11 y 7.12 se utilizan para establecer las proporciones de las mezclas de hormigón en peso y en volumen, respectivamente. Estas tablas proporcionan relaciones de los componentes con una suma igual a la unidad. Por tanto, el peso o el volumen totales de la mezcla de hormigón puede multiplicarse por las relaciones indicadas, para obtener el peso o el volumen de cada componente. Observe que para obtener las proporciones según el volumen, el volumen combinado es aproximadamente igual a dos tercios de la suma de los volúmenes originales de los componentes, ya que el agua y los materiales finos rellenan los huecos existentes entre los materiales gruesos.

Problema de ejemplo 7.5

Determine los pesos requeridos de los ingredientes para fabricar un lote de 3500 libras de mezcla de hormigón sin airear con un tamaño máximo de grava de 1/2 de pulgada.

Solución

A partir de la Tabla 7.11:

Peso del cemento $= 3500 \times 0{,}185 = 647{,}5$ libras

Peso del árido fino húmedo $= 3500 \times 0{,}363 = 1270{,}5$ libras

Peso del árido grueso húmedo $= 3500 \times 0{,}377 = 1319{,}5$ libras

Peso del agua $= 3500 \times 0{,}075 = 262{,}5$ libras

■

Problema de ejemplo 7.6

Determine los volúmenes requeridos de los ingredientes para fabricar un lote de 0,5 m^3 de mezcla de hormigón aireado con un tamaño de grava máximo de 19 mm.

Solución

Suma de los volúmenes originales de los componentes $= 0{,}5 \times 1{,}5 = 0{,}75$ m^3. A partir de la Tabla 7.12:

Volumen del cemento $= 0{,}75 \times 0{,}160 = 0{,}12$ m^3

Volumen del árido fino húmedo $= 0{,}75 \times 0{,}360 = 0{,}27$ m^3

Volumen del árido grueso húmedo $= 0{,}75 \times 0{,}400 = 0{,}3$ m^3

Volumen del agua $= 0{,}75 \times 0{,}080 = 0{,}06$ m^3

7.2 Mezclado, colocación y manipulación del hormigón fresco

La adecuada dosificación, mezcla y manipulación del hormigón fresco son prerrequisitos importantes para conseguir estructuras fuertes y duraderas de hormigón. A continuación, se exponen los pasos básicos y las precauciones que hay que tomar a la hora de mezclar y manejar el hormigón fresco (Mehta y Monteiro, 1993; Instituto americano del hormigón (ACI), 1982; Instituto americano de hormigón (ACI), 1983).

El proceso de dosificación consiste en medir e introducir los ingredientes del hormigón en la mezcladora. La dosificación por peso es más precisa que la dosificación por volumen, dado que la primera evita los problemas derivados del hinchamiento de la arena húmeda. Sin embargo, el agua y los aditivos líquidos pueden medirse de manera precisa mediante el peso o el volumen. Por otro lado, la dosificación por volumen se usa comúnmente cuando se emplean mezcladoras continuas o se hace una mezcla manual.

El hormigón debe mezclarse completamente en una mezcladora o manualmente, hasta que adquiera una apariencia uniforme. La mezcla a mano suele estar limitada a pequeños trabajos o situaciones en las que no haya disponibles mezcladoras mecánicas. Entre las mezcladoras mecánicas se incluyen las mezcladoras a pie de obra y las mezcladoras centrales en las plantas de fabricación de hormigón premezclado. La capacidad de estas mezcladoras varía entre 1,5 m^3 y 9 m^3 (2 yd^3 y 12 yd^3). Estas máquinas también difieren en cuanto al tipo, existiendo mezcladoras oscilantes, no oscilantes y de bandeja. La mayoría de las mezcladoras son del tipo hormigonera, aunque hay disponibles otras de tipo continuo.

El tiempo de mezcla y el número de revoluciones varían con el tamaño y el tipo de mezcladora. Las especificaciones suelen requerir un mínimo de un minuto de mezcla para mezcladoras estáticas de hasta 0,75 m^3 (1 yd^3) de capacidad, con un incremento de 15 segundos por cada 0,75 m^3 adicionales de capacidad. Las mezcladoras suelen



FIGURA 7.4 Planta de fabricación de hormigón premezclado.

cargarse con un 10% de agua, unas aportaciones uniformes de sólidos y el 80% del agua. Finalmente, el resto del agua se introduce en la mezcladora.

7.2.1 Hormigón premezclado

El hormigón premezclado se mezcla en una planta central de fabricación y se lleva hasta la obra en camiones mezcladores, estando el hormigón listo para su colocación (Figura 7.4). Para el hormigón premezclado pueden emplearse tres métodos de mezcla:

1. El hormigón mezclado en fábrica se elabora completamente en una mezcladora estática y se suministra en un camión con hormigonera giratoria (2 rpm a 6 rpm).
2. El hormigón parcialmente premezclado se mezcla en parte en una mezcladora estacionaria y se completa en un camión mezcladora (4 rpm a 16 rpm).
3. El hormigón amasado en camión se mezcla completamente en un camión mezcladora (4 rpm a 16 rpm).

Los fabricantes de los camiones suelen especificar la velocidad de rotación de sus equipos. Asimismo, las especificaciones limitan el número de revoluciones en los camiones mezcladoras, con el fin de evitar la segregación del hormigón. Además, el hormigón tiene que descargarse en la obra en menos de 90 minutos desde el inicio del proceso de mezcla, incluso si se emplean agentes retardantes (ASTM C94).



FIGURA 7.5 Mezcladora con dosificador móvil en la obra.

7.2.2 Hormigón mezclado con dosificador móvil

El hormigón puede mezclarse en una mezcladora con dosificador móvil disponible en la obra (Figura 7.5). El árido, el cemento, el agua y los aditivos se aportan de manera continua según los respectivos volúmenes y el hormigón suele bombearse dentro de los encofrados.

7.2.3 Depósito del hormigón

Hay disponibles varios métodos para depositar el hormigón en la obra. El hormigón debe depositarse de manera continua lo más cerca posible de su posición final. Es esencial una planificación anticipada y un adecuado manejo del hormigón para reducir los retardos, con el fin de evitar que el hormigón se seque o se vuelva rígido demasiado pronto y para que no se produzca una segregación de los componentes. Las Figuras 7.6 a 7.9 muestran distintos métodos utilizados para depositar el hormigón en la obra.

7.2.4 Hormigón bombeado

El hormigón bombeado suele utilizarse con frecuencia en grandes proyectos de construcción. Una serie de bombas especiales suministran el hormigón directamente a los encofrados (véase la Figura 7.10). Hay que prestar una cuidadosa atención para garantizar que se disponga siempre de un hormigón siempre bien mezclado y con una facilidad de trabajo apropiada. El grado de asentamiento debe estar entre 40 mm y 100 mm (1-1/2 y 4 pulgadas) antes del bombeo. Durante el bombeo, el grado de asentamiento se



FIGURA 7.6 Carga del hormigón en una carretilla.



FIGURA 7.7 Fabricación de una losa de hormigón.



FIGURA 7.8 Colocación de un pavimento de hormigón con una pavimentadora de encofrado deslizante.



FIGURA 7.9 Colocación del hormigón mediante una cubeta de 2-1/2 yardas cúbicas.



FIGURA 7.10 Bombeo de hormigón en un muro de contención.

reduce entre 12 mm y 25 mm (1/2 pulgada y 1 pulgada), debido a la compactación parcial. Durante el bombeo puede producirse algún tipo de bloqueo debido al escape del agua a través de los huecos de la mezcla a causa de la fricción en el caso de que el contenido de materiales finos sea demasiado alto (Neville, 1981).

7.2.5 Vibración del hormigón

Para disponer de un hormigón de buena calidad se requiere una consolidación completa de la mezcla, que permita reducir el aire atrapado en la misma. En los proyectos pequeños, esa consolidación se puede conseguir manualmente apisonando el hormigón. En proyectos grandes se utilizan vibradores para consolidarlo. Existen distintos tipos de vibradores, dependiendo de la aplicación. El tipo más común utilizado en proyectos de construcción es el *vibrador interno* (véase la Figura 7.11). Están compuestos de una masa excéntrica albergada dentro de una cabeza vibradora. Esa masa rota a alta velocidad para producir la vibración. La cabeza vibradora se asienta y se levanta lentamente por toda la capa de hormigón, penetrando en la capa subyacente si esta se encuentra todavía en estado plástico. La cabeza vibradora se deja actuar entre cinco segundos y dos minutos, dependiendo del tipo de vibrador y de la consistencia del hormigón. El operador es quien se encarga de juzgar el tiempo de vibración total requerido. Un exceso de vibración provoca una segregación del hormigón a medida que el mortero migra hacia la superficie.



FIGURA 7.11 Consolidación del hormigón con un vibrador de tipo interno.

En la producción de hormigón prefabricado se emplean diferentes tipos especiales de vibradores, entre los que se incluyen los *vibradores externos,* las *tablas vibradoras,* las *superficies vibradoras,* los *martillos eléctricos* y los *rodillos vibradores* (Neville, 1981).

7.2.6 Errores y precauciones a la hora de mezclar agua

Puesto que la relación agua–materiales cementosos desempeña un papel importante a la hora de determinar la calidad del hormigón, es preciso controlar cuidadosamente el contenido de agua de la mezcla. Durante el transporte no debe añadirse el agua al hormigón. El personal de la obra frecuentemente desea incrementar la cantidad de agua con el fin de facilitar el trabajo del hormigón pero, si se añade agua, el hormigón endurecido sufrirá una seria pérdida de calidad y resistencia. El encargado de la obra debe impedir todos los intentos de incrementar la cantidad de agua de la mezcla en el hormigón más allá de lo que se haya especificado en el diseño de la mezcla.

7.2.7 Medida del contenido de aire en el hormigón fresco

La mezcla y la manipulación del hormigón pueden alterar significativamente el contenido de aire del hormigón fresco. Por tanto, se realizan pruebas a pie de obra para garantizar que el hormigón tenga el contenido de aire apropiado antes de su colocación. El contenido de aire puede medirse utilizando distintos métodos: el de presión, el volumétrico, el gravimétrico o el indicador de aire de Chace.

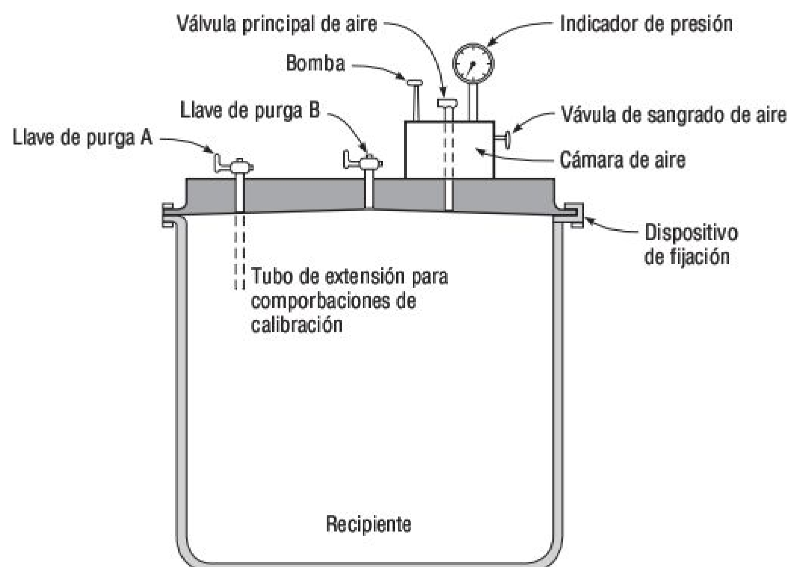


FIGURA 7.12 Aparato de determinación del volumen de los huecos de aire contenidos en el hormigón fresco según el método de la presión. Medidor tipo B (ASTM C231). (Copyright ASTM. Reimpreso con su permiso.)

El método de presión (ASTM C231) se emplea ampliamente, ya que requiere menos tiempo que el método volumétrico. El método de presión se basa en la ley de Boyle, que relaciona la presión con el volumen. Con este método, se rellena un cilindro calibrado (Figura 7.12) con hormigón fresco. El recipiente se tapa y se aplica una presión de aire. Esa presión aplicada comprime el aire contenido en los huecos del hormigón. El volumen de los huecos de aire se determina midiendo cuánto se reduce el volumen, para la presión aplicada. Este método no es válido para hormigón hecho con áridos ligeros, dado que el aire de los huecos de los áridos también se comprime, confundiendo así la medida del contenido de aire de la pasta de cemento.

El método volumétrico para determinar el contenido de aire (ASTM C173) puede utilizarse para hormigón hecho con cualquier tipo de árido. El proceso básico implica colocar el hormigón en un cilindro de volumen fijo, como se muestra en la Figura 7.13, y añadir después al contenedor un volumen igual de agua. La agitación del contenedor permite que el agua en exceso desplace el aire contenido en los huecos de la pasta de cemento. El nivel de agua del contenedor caerá a medida que el aire se eleve hasta la parte superior del mismo. De ese modo, se mide directamente el volumen de aire contenido en la pasta de cemento. La precisión del método depende de que la muestra se agite lo suficiente como para extraer de ella todo el aire que contenga.

El método gravimétrico (ASTM C138) compara el peso unitario del hormigón mezclado fresco con el peso unitario máximo de la mezcla. El peso unitario teórico se calcula a partir de las proporciones de la mezcla y de la gravedad específica de cada

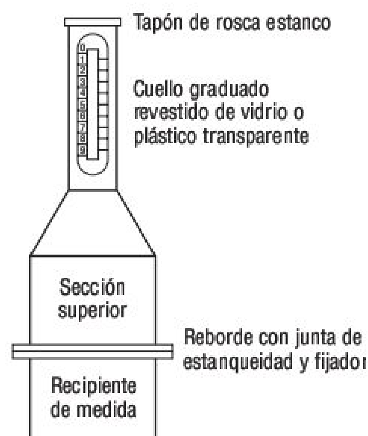


FIGURA 7.13 Aparato para determinación del volumen de los huecos de aire en el hormigón fresco según el método volumétrico (ASTM C173). (Copyright ASTM. Reimpreso con su permiso.)

ingrediente. Este método requiere unas medidas muy precisas de la gravedad específica, por lo que es más adecuado para las pruebas de laboratorio que para las pruebas a pie de obra.

La prueba del indicador de Chace (AASHTO T199) es un método rápido utilizado para determinar el contenido de aire del hormigón mezclado fresco. El dispositivo está compuesto por un pequeño tubo de vidrio con un vástago, un tapón de caucho y una cubeta metálica montada sobre el tapón, como se muestra en la Figura 7.14. La cubeta metálica se rellena con mortero de cemento procedente del hormigón sometido a ensayo. El indicador se rellena con alcohol hasta un nivel especificado y luego el tapón se inserta en el indicador. Después se cierra el indicador con un dedo y se agita hasta que todo el mortero se disperse en el alcohol y todo el aire resulte desplazado por el alcohol. Con el indicador en posición vertical se lee el nivel de alcohol en el vástago. A continuación, esta lectura se ajusta utilizando una serie de valores o tablas de calibración



FIGURA 7.14 Indicador de aire de Chace.

para determinar el contenido de aire. La prueba del indicador de aire de Chace puede emplearse para monitorizar rápidamente el contenido de aire, pero no resulta muy preciso, ni tiene la repetibilidad requerida para controlar el cumplimiento de las especificaciones. Resulta especialmente útil para medir el contenido de aire de áreas pequeñas próximas a la superficie que puedan haber perdido parte del aire debido a un acabado inadecuado.

Estos métodos de medición del contenido de aire determinan la cantidad total de aire, incluyendo tanto el aire atrapado como el correspondiente al mecanismo de aireación, así como los huecos de aire de las partículas de árido. Pero solo las diminutas burbujas producidas por los agentes de aireación permiten incrementar la durabilidad del hormigón. Sin embargo, en el estado actual de la técnica, no se puede distinguir entre los distintos tipos de aire contenidos en el hormigón fresco.

7.2.8 Distribución y acabado del hormigón

Existen distintos métodos para distribuir el hormigón y realizar su acabado, dependiendo de la naturaleza de la estructura y de los equipos disponibles. Entre las herramientas y equipos usados para la distribución y el acabado del hormigón se incluyen las aplanadoras manuales, las mecánicas, las fratás, las niveladoras, las allanadoras, las enrasadoras vibratorias y los encofrados deslizantes (véanse las Figuras 7.8, 7.15–7.18).



FIGURA 7.15 Distribución del hormigón mediante una niveladora.



FIGURA 7.16 Acabado del hormigón con una niveladora.



FIGURA 7.17 Acabado del hormigón con una aplanadora metálica.



FIGURA 7.18 Acabado del hormigón con una niveladora láser.

7.3 Curado del hormigón

El curado es el proceso de mantener un grado de humedad y una temperatura satisfactorios en el hormigón durante un periodo de tiempo definido. La hidratación del cemento es un proceso a largo plazo y requiere una cantidad de agua y una temperatura apropiadas. Por tanto, el curado implica una hidratación continua y, consecuentemente, una ganancia continua en la resistencia del hormigón. De hecho, una vez que se detiene el proceso de curado, el hormigón se seca y la ganancia de resistencia se para, como se indica en la Figura 7.19. Si el hormigón no se cura y se permite que se seque al aire, solo ganará aproximadamente un 50% de la resistencia de un hormigón sometido a un proceso de curado continuo. Si el hormigón se cura solo durante tres días alcanzará un 60% de la resistencia del hormigón sometido a crurado continuo; si se cura durante siete días, alcanzará un 80% de esa resistencia. Si el curado se detiene durante un cierto tiempo y luego se reanuda, la ganancia de resistencia también se detiene y vuelve a reactivarse.

El aumento de la temperatura hace que se incremente la velocidad de hidratación y, en consecuencia, la velocidad de desarrollo de la resistencia. Las temperaturas por debajo de 10°C (50°F) no son favorables para la hidratación y deben evitarse, en la medida de lo posible, principalmente en las primeras etapas del curado.

Aunque para una estructura concreta no haga falta un hormigón de alta resistencia, siempre se suele poner el énfasis en la resistencia y en controlarla cuidadosamente, ya

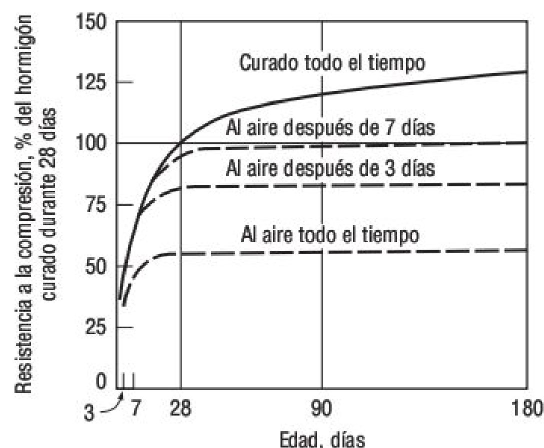


FIGURA 7.19 Resistencia a la compresión del hormigón en diferentes etapas y para distintos niveles de curado.

que es una indicación de la calidad del hormigón. Así, un curado adecuado no sólo incrementa la resistencia, sino que también proporciona otras propiedades deseables, como durabilidad, estanqueidad, resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen, resistencia a la congelación y la descongelación, y resistencia a la acción de productos químicos anticongelantes.

El curado debe iniciarse después del fraguado final del cemento. Si el hormigón no se cura después del fraguado, se contraerá apareciendo grietas. La contracción de secado puede evitarse si se proporciona una cantidad suficiente de agua durante un largo periodo de tiempo. Un ejemplo de curado inapropiado sería un suelo de hormigón construido directamente sobre el subsuelo y no curado en la superficie, dejando que sea la humedad del suelo la que se encargue de curar el hormigón desde la parte inferior. En este caso, la losa de hormigón puede curvarse a causa de las diferencias relativas en la contracción.

El curado puede realizarse mediante cualquiera de los siguientes métodos:

1. Manteniendo la presencia de agua en el hormigón durante las primeras etapas. Entre los métodos para mantener la presión del agua se incluyen la inundación o inmersión, la pulverización o nebulización y las cubiertas húmedas.
2. Impidiendo la pérdida del agua de la mezcla de hormigón, sellando la superficie. Entre los métodos para impedir la pérdida de agua se incluyen las láminas plásticas o de papel impermeabilizantes, los compuestos membranogénicos y dejar colocados los encofrados.
3. Acelerando la ganancia de resistencia suministrando al hormigón calor y humedad adicionales. Los métodos de curado acelerados incluyen el curado por vapor, las cubiertas aislantes y diversas técnicas de calefacción.

Observe que impedir la pérdida de agua de la mezcla de hormigón sellando la superficie no resulta tan efectivo como mantener la presencia de agua en el hormigón du-

rante las primeras etapas. La selección del método específico de curado o de la combinación específica de métodos, dependerá de la disponibilidad de materiales de curado, del tamaño y la forma de la estructura, de si la producción del hormigón se hace a pie de obra o en la planta de fabricación, de consideraciones de costes y de aspectos estéticos. (Kosmatka *et al.*, 2002; Instituto americano del hormigón, ACI, 1986a).

7.3.1 Inundación o inmersión

La inundación implica recubrir la superficie expuesta de la estructura de hormigón con agua. La inundación puede conseguirse construyendo diques de tierra alrededor de la superficie del hormigón para retener el agua. Este método es adecuado para superficies planas, como suelos y pavimentos, especialmente en proyectos de pequeña envergadura. El método requiere una mano de obra y una tarea de supervisión intensivas. La inmersión se emplea para curar probetas de ensayo en los laboratorios, así como otros elementos de hormigón según sea apropiado.

7.3.2 Pulverización o nebulización

Puede emplearse un sistema de toberas o pulverizadores para proporcionar agua de forma continua (véanse las Figuras 7.20 y 7.21). Este método requiere una gran cantidad de agua y puede resultar caro. Es adecuado en entornos con altas temperaturas y un bajo grado de humedad. Los laboratorios de ensayo comerciales suelen disponer de una cámara con temperatura y humedad controladas para curar las probetas de ensayo.

7.3.3 Cubiertas húmedas

En muchas aplicaciones se utilizan para retener la humedad cubiertas de tela saturadas con agua como arpilleras, mallas de algodón y alfombrillas (véase la Figura 7.22). La tela puede mantenerse húmeda, mojándola periódicamente o recubriéndola con una capa de polietileno para retener la humedad. En proyectos pequeños, pueden utilizarse cubiertas húmedas de tierra, arena, serrín, heno o paja. Con algunos tipos de cubiertas húmedas, pueden aparecer en el hormigón manchas o decoloraciones.

7.3.4 Láminas de plástico o papel impermeables

La evaporación de la humedad del hormigón puede reducirse utilizando papeles impermeables, como el papel aislante o láminas de plástico como, por ejemplo de polietileno (véanse las Figuras 7.23 y 7.24). Los papeles impermeables son adecuados para superficies horizontales y para estructuras de hormigón con formas simples, mientras que los recubrimientos plásticos son efectivos y pueden aplicarse fácilmente a diversos tipos de formas estructurales. Cuando se utilizan papeles impermeables o recubrimientos plásticos no hace falta mojar el hormigón de forma periódica. Sin embargo, sí que pueden aparecer decoloraciones en la superficie del hormigón.



FIGURA 7.20 Curado del hormigón por pulverización.



FIGURA 7.21 Curado del hormigón por nebulización.

7.3.5 Compuestos membranogénicos

Pueden aplicarse varios tipos de compuestos líquidos membranogénicos a la superficie del hormigón, para reducir o retardar la pérdida de humedad. Estos compuestos pueden utilizarse para curar el hormigón fresco, pero también el endurecido, después de quitar los encofrados o de realizado el curado. Los compuestos para el curado pueden

aplicarse a mano o utilizando equipos pulverizadores (véanse las Figuras 7.25 y 7.26). Suelen aplicarse en una o dos capas (en este último caso, una capa se aplica en sentido perpendicular a la otra). Normalmente, la superficie del hormigón debe estar húmeda en el momento de aplicar el compuesto de curado. Estos compuestos no deben emplearse cuando haya que colocar capas subsiguientes de hormigón, ya que pueden debilitar la unión entre las sucesivas capas. Asimismo, algunos compuestos afectan a la unión entre la superficie del hormigón y las capas de pintura.



FIGURA 7.22 Curado del hormigón mediante una cubierta húmeda.



FIGURA 7.23 Curado del hormigón con telas impermeables.



FIGURA 7.24 Curado del hormigón con recubrimiento plástico.



FIGURA 7.25 Curado del hormigón aplicando de forma manual un compuesto membranogénico.



FIGURA 7.26 Curado del hormigón aplicando con máquina un compuesto membranogénico.

7.3.6 Conservación de los encofrados

La pérdida de humedad puede reducirse dejando los encofrados el mayor tiempo posible, siempre que la superficie superior del hormigón expuesta al aire se mantenga húmeda. Si se utilizan encofrados de hormigón, también los propios encofrados deben mantenerse húmedos. Una vez retirados los encofrados, puede utilizarse algún otro método de curado.

7.3.7 Curado por vapor

El curado por vapor se utiliza cuando hace falta una ganancia temprana de resistencia del hormigón o cuando es necesario aplicar calor adicional en climas fríos. El curado por vapor puede realizarse con o sin presión. El vapor a presión atmosférica se utiliza para estructuras cerradas fabricadas in situ y elementos prefabricados de gran tamaño. Puede emplearse vapor a alta presión, suministrado mediante autoclaves, en pequeñas plantas de fabricación.

7.3.8 Cubiertas aislantes

Cuando la temperatura cae por debajo de la de congelación, es necesario aislar el hormigón utilizando capas de material seco y poroso, como heno o paja. Para aislar los encofrados pueden emplearse cubiertas aislantes fabricadas con fibra de vidrio, fibras de celulosa, espuma de goma, lana mineral, espuma de vinilo o espuma poliuretano de célula abierta. También pueden utilizarse recubrimientos comerciales a prueba de humedad.

7.3.9 Curado eléctrico, mediante aceite caliente e infrarrojos

Las secciones de hormigón prefabricado pueden curarse utilizando técnicas de calefacción basadas en energía eléctrica, aceite o rayos infrarrojos. El curado eléctrico implica la utilización de encofrados de acero y cubiertas eléctricamente calentados. Puede utilizarse como elemento calefactor la propia armadura de acero, usando el hormigón como conductor eléctrico. Los encofrados de acero también pueden calentarse haciendo circular aceite caliente por fuera de la estructura. Los rayos infrarrojos también se han empleado de forma limitada para el curado del hormigón.

7.3.10 Periodo de curado

El periodo de curado debe ser lo más largo posible. El tiempo mínimo dependerá de diversos factores, como el tipo de cemento, las proporciones de la mezcla, la resistencia requerida, el clima, el tamaño y forma de la estructura, las condiciones futuras de exposición y el método de curado. Para la mayoría de las estructuras de hormigón, el periodo de curado a temperaturas por encima de 5°C (40°F) tiene que ser de un mínimo de siete días, o hasta que se consiga el 70% de la resistencia a la compresión o de flexión especificada. El periodo de curado puede reducirse a tres días si se utiliza hormigón con una alta resistencia inicial y la temperatura es superior a 10°C (50°F).

7.4 Propiedades del hormigón endurecido

Es importante que el ingeniero comprenda las propiedades básicas del hormigón de cemento portland endurecido y que sea capaz de evaluar dichas propiedades. Las propiedades principales del hormigón endurecido que interesan a los ingenieros civiles y de la construcción son el cambio inicial de volumen, la reptación, la permeabilidad y la relación esfuerzo–deformación.

7.4.1 Cambio inicial de volumen

Cuando la pasta de cemento está todavía en estado plástico, sufre una ligera disminución de volumen de aproximadamente el 1%. Esta contracción se conoce como *contracción plástica* y se debe a la pérdida de agua de la pasta de cemento, bien por evaporación, o bien por succión desde el hormigón seco situado debajo del hormigón fresco. La contracción plástica puede provocar la aparición de fisuras (Figura 7.27); puede prevenirse o reducirse controlando la pérdida de agua.

Además de la posible reducción de volumen cuando el hormigón está todavía en estado plástico, también puede producirse otra forma de cambio de volumen después del fraguado, especialmente en las capas tempranas. Si el hormigón no se ha curado apropiadamente y se le deja secar, se contraerá. Esta contracción se denomina *contracción de secado*, y también provoca la aparición de grietas. La contracción tiene lugar a lo



FIGURA 7.27 Grietas debidas a la contracción plástica.

largo de un periodo de tiempo dilatado, aunque la velocidad de contracción es alta al principio y luego se reduce rápidamente con el paso del tiempo. De hecho, entre un 15% y un 30% de la contracción se produce durante las dos primeras semanas, mientras que entre un 65% y un 85% tiene lugar en el primer año. La contracción y las grietas inducidas por esta se ven incrementadas por varios factores, incluyendo la falta de curado, una alta relación agua–materiales cementosos, un alto contenido en cemento, un bajo contenido en árido grueso, la existencia de armadura de acero y el envejecimiento. Por otro lado, si el hormigón se cura en agua de forma continua después del fraguado, se hinchará muy ligeramente debido a la absorción de agua. Puesto que esa hinchazón, si sucede, es muy pequeña, no provoca ningún problema significativo. La *hinchazón* va acompañada por un ligero aumento de peso (Neville, 1981).

El grado de contracción de secado dependerá del tamaño y de la forma de la estructura de hormigón. Asimismo, puede producirse una contracción no uniforme debido a la pérdida no uniforme de agua. Esto puede suceder en las estructuras masivas de hormigón, en las que se pierde más agua en la superficie que en el interior. En casos como estos, pueden aparecer grietas en la superficie. En tales casos, pueden producirse alabeos debidos a que el curado no es uniforme en toda la estructura, por lo que la contracción tampoco lo es.

7.4.2 Propiedades de reptación

La reptación se define como el incremento gradual de la deformación con el tiempo, bajo una carga sostenida. La reptación del hormigón es un proceso a largo plazo, que tiene lugar a lo largo de muchos años. Aunque la cantidad de reptación en el hormigón

es relativamente pequeña, puede afectar al comportamiento de las estructuras. El efecto de la reptación varía con el tipo de estructura: en las vigas de hormigón armado con un único punto de soporte, la reptación incrementa la deflexión y, por tanto, el esfuerzo al que el acero se ve sometido; en los pilares de hormigón armado, la reptación provoca una transferencia gradual de la carga desde el hormigón al acero. La reptación también puede provocar la pérdida de parte de la tensión en las estructuras de hormigón pretensado, aunque el uso de acero de alta resistencia a la tracción reduce este efecto. Se han utilizado modelos reológicos, de los que ya hemos hablado en el Capítulo 1, para analizar la respuesta del hormigón a la reptación (Neville, 1981).

7.4.3 Permeabilidad

La permeabilidad es un factor importante que afecta en gran medida a la durabilidad del hormigón endurecido. El hormigón permeable permite que el agua y las sustancias químicas penetren en él, lo que a su vez reduce la resistencia de la estructura del hormigón al hielo, a la reactividad álcali–árido y a otros ataques químicos. El agua que penetra en el hormigón armado provoca la corrosión de la armadura de acero. Además, en las estructuras estancas, como los tanques y presas, la utilización de hormigón impermeable es un prerrequisito.

Típicamente, los huecos de aire en la pasta de cemento y en los áridos son pequeños y no afectan a la permeabilidad. Sin embargo, hay huecos de aire que sí afectan a la permeabilidad del hormigón endurecido y que proceden de dos fuentes principales: una inadecuada consolidación del hormigón fresco y los huecos resultantes de la evaporación de agua de la mezcla que no ha sido utilizada para la hidratación del cemento.

Por tanto, el incrementar la relación agua–materiales cementosos en el hormigón fresco tiene un efecto muy acusado sobre la permeabilidad. La Figura 7.28 muestra la dependencia típica entre la relación agua–materiales cementosos y el coeficiente de

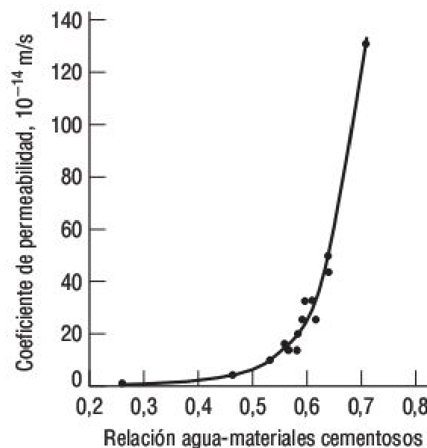


FIGURA 7.28 Dependencia entre la relación agua-materiales cementos y la permeabilidad de la pasta de cemento maduro.

permeabilidad de la pasta de cemento madura (Powers, 1954). Podemos ver en la figura que al incrementarse la relación agua–materiales cementosos de 0,3 a 0,7 se incrementa el coeficiente de permeabilidad en un factor de 1000. Para que el hormigón sea estanco, la relación agua–materiales cementosos no debe exceder de 0,48 para la exposición a agua fresca y de 0,54 para la exposición a agua marina (Instituto americano del hormigón, 1975).

Otros factores que afectan a la permeabilidad son la edad del hormigón, la finura de las partículas de cemento y los agentes de aireación. La edad reduce la permeabilidad, porque los productos de hidratación rellenan los espacios entre los gránulos de cemento. Por otro lado, cuanto más finas sean las partículas de cemento, más rápida será la velocidad de hidratación y más rápido será también el desarrollo del hormigón impermeable. Los agentes de aireación reducen indirectamente la permeabilidad, ya que permiten utilizar una relación agua–materiales cementosos más baja.

7.4.4 Relación esfuerzo–deformación

En la Figura 7.29 se muestra la relación típica esfuerzo–deformación del hormigón de 28 días, para distintas relaciones agua–materiales cementosos (Hognestad *et al.*, 1955). Podemos ver que al incrementar la relación agua–materiales cementosos se reducen tanto la resistencia como la rigidez del hormigón. La figura también muestra que la relación esfuerzo–deformación es casi lineal para niveles de esfuerzo bajos y luego pasa a ser no lineal cuando el esfuerzo se incrementa. Con una relación agua–materiales cementosos de 0,50 o inferior y una deformación de hasta 0,0015, la relación esfuerzo–deformación es prácticamente lineal. Con relaciones agua–materiales cementosos más altas, el comportamiento esfuerzo–deformación pasa a ser no lineal para deformaciones más pequeñas. Las curvas muestran también que el hormigón de alta resistencia presenta picos agudos y características de fractura súbitas, cuando se compara con el hormigón de baja resistencia.

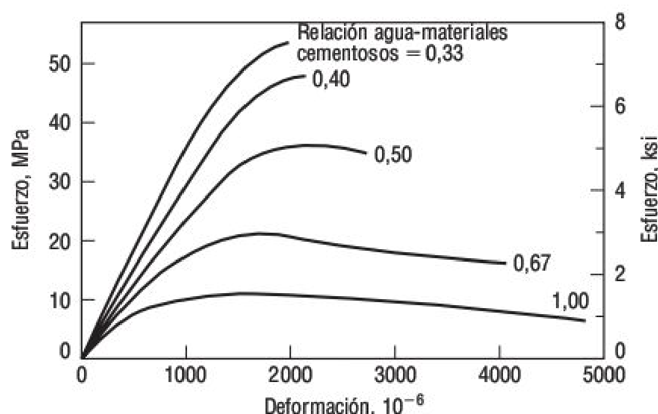


FIGURA 7.29 Relaciones típicas de esfuerzo–deformación para pruebas de compresión con cilindros de hormigón de 0,15 x 0,30-m con una edad de 28 días.

Como se ha explicado en el Capítulo 1, el límite elástico puede definirse como el mayor esfuerzo que no provoca una deformación permanente mensurable. Cuando el hormigón se carga ligeramente por encima del rango elástico y luego se descarga, puede que permanezca inicialmente una pequeña cantidad de deformación, pero el hormigón puede llegar a recuperarse debido a la reptación. Asimismo, dado que el hormigón no es perfectamente elástico, la velocidad de carga afectará en cierta medida a la relación esfuerzo–deformación. Por tanto, para probar el hormigón se requiere una velocidad específica de carga. Es interesante observar que la forma de la relación esfuerzo–deformación del hormigón es casi igual para la compresión y para la tracción, aunque la resistencia a la tracción es mucho más pequeña que la resistencia a la compresión. De hecho, la resistencia a la tracción del hormigón puede ignorarse en el diseño de estructuras de hormigón.

El módulo de elasticidad del hormigón se utiliza comúnmente al diseñar estructuras de hormigón. Dado que la relación esfuerzo–deformación no es exactamente lineal, no es aplicable la definición clásica del módulo de elasticidad (módulo de Young). El módulo de tangente inicial del hormigón tiene muy poca importancia práctica. El módulo de tangente solo es válido para un nivel de esfuerzo pequeño, para el que se determina la tangente. Tanto el módulo de secante como el de cuerda representan valores de módulo "promedios" para ciertos rangos de esfuerzo. El módulo de cuerda (denominado módulo de elasticidad) en compresión es el que se emplea de manera más común para el hormigón y se determina de acuerdo con la norma ASTM C469. El método requiere que se apliquen tres o cuatro ciclos de carga y descarga, después de los cuales se determina el módulo de cuerda entre un punto correspondiente a un valor de deformación muy pequeño y un punto correspondiente al 40% del esfuerzo máximo o un valor de deformación específico. El hormigón de peso normal tiene un módulo de elasticidad de entre 14 GPa y 40 GPa (2.000 ksi y 6.000 ksi).

La relación de Poisson también se puede determinar utilizando ASTM C469. Esta relación se emplea en el análisis estructural avanzado de cubiertas laminares, tejados planos y losas continuas de cimentación. La relación de Poisson del hormigón varía entre 0,11 y 0,21, dependiendo del tipo de árido, del grado de humedad, de la edad del hormigón y de la resistencia a la compresión. Normalmente, se utiliza un valor comprendido entre 0,15 y 0,20.

Resulta interesante observar que tanto el árido como la pasta de cemento, cuando se prueban individualmente, exhiben un comportamiento esfuerzo–deformación lineal. Sin embargo, la relación esfuerzo–deformación del hormigón es no lineal. La razón de este cambio de comportamiento se atribuye a las microfisuras existentes entre la interfaz de las partículas de árido y la pasta de cemento (Shah y Winter, 1968).

El módulo de elasticidad del hormigón se incrementa cuando disminuye la resistencia a la compresión, como se ilustra en la Figura 7.29. Se han definido diversas relaciones empíricas entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión. Para un hormigón de peso normal, la relación utilizada en Estados Unidos para el diseño de estructuras de hormigón está definida por la Norma de construcción ACI como:

$$E_c = 4.731\sqrt{f'_c} \quad (7.3a)$$

o

$$E_c = 57.000\sqrt{f'_c} \quad (7.3b)$$

donde

E_c = módulo de elasticidad,

f'_c = resistencia a la compresión.

La Ecuación 7.3a se utiliza para unidades del sistema internacional (SI), en cuyo caso tanto E_c como f'_c están en MPa, mientras que la Ecuación 7.3b se emplea para las unidades habituales en Estados Unidos, en cuyo caso tanto E_c como f'_c están en psi. Esta relación es útil, ya que relaciona el módulo de elasticidad (necesario para diseñar estructuras de hormigón) con la resistencia a la compresión, que puede medirse fácilmente en el laboratorio.

Problema de ejemplo 7.7

Un hormigón de peso normal tiene una resistencia media a la compresión de 30 MPa. ¿Cuál será el módulo de elasticidad estimado?

Solución

$$E_c = 4731\sqrt{f'_c} = 4731\ (30)^{1/2} = 25.913 \text{ MPa} = 25{,}9 \text{ GPa}$$

7.5 Pruebas del hormigón endurecido

Se utilizan muchas pruebas para evaluar las propiedades del hormigón endurecido, bien en el laboratorio bien a pie de obra. Algunas de estas pruebas son destructivas, mientras que otras no lo son. Las pruebas pueden llevarse a cabo con diferentes propósitos; sin embargo, principalmente se emplean para controlar la calidad del hormigón y comprobar el cumplimiento de las especificaciones. Probablemente, la prueba más común realizada con el hormigón endurecido es la de la resistencia a la compresión, ya que es relativamente fácil de realizar y existe una correlación fuerte entre dicha resistencia y otras muchas propiedades deseables del hormigón (Neville, 1981; Mehta y Monteiro, 1993). Entre otras pruebas se incluyen la de la compresión diametral, la prueba de resistencia a la flexión, la del esclerómetro, la de la resistencia a la penetración, la de velocidad de los pulsos ultrasónicos y la de maduración.

7.5.1 Prueba de resistencia a la compresión

La prueba de la resistencia a la compresión es la que comúnmente más se efectúa con el hormigón endurecido. La resistencia a la compresión es uno de los principales requisitos del diseño estructural para garantizar que la estructura será capaz de soportar la carga pretendida. Como hemos indicado anteriormente, la resistencia a la compresión aumenta a medida que se reduce la relación agua–materiales cementosos. Puesto que esta última relación está directamente relacionada con la calidad del hormigón, la resistencia a la compresión también se emplea como medida de calidad, para estimar la durabilidad y la resistencia a la meteorización. De este modo, en muchos caso, los diseñadores especifican una alta resistencia a la compresión para el hormigón con el fin de garantizar una alta calidad del mismo, incluso aunque esa resistencia no sea necesaria para el soporte estructural. La resistencia a la compresión f'_c del hormigón de peso normal se encuentra entre 20 MPa y 40 MPa (3000 psi y 6000 psi). En Estados Unidos, la prueba se realiza con probetas cilíndricas y está estandarizada por la norma ASTM C39. La probeta se prepara en el laboratorio o a pie de obra de acuerdo con ASTM C192 o C31, respectivamente. También puede horadarse un testigo en la propia estructura de acuerdo con la norma ASTM C42. El tamaño estándar de las probetas es de 0,15 m (6 pulgadas) de diámetro y de 0,30 (12 pulgadas) de altura, aunque también pueden utilizarse otros tamaños que tengan una relación diámetro–altura igual a dos. El diámetro de la probeta debe ser de al menos tres veces el tamaño máximo nominal del árido grueso del hormigón.

En el laboratorio, las probetas se preparan en tres capas iguales, apisonándose 25 veces por capa. Una vez acabada la superficie, las probetas se conservan en el encofrado durante las primeras 24 ± 3 horas. Después, se extraen del encofrado y se curan a 23 ± 1,7°C (73,4 ± 3°F) bien en agua saturada de cal o en una habitación con humedad controlada, que tenga una humedad relativa del 95% o superior, hasta que llegue el momento de la prueba. Antes de efectuar la prueba, las dos bases de las probetas se tapan para garantizar que sus superficies sean paralelas. Para tapar los dos extremos puede emplearse yeso de alta resistencia, mortero de azufre o un compuesto especial de recubrimiento, aplicándose el material con un dispositivo de alineación especial (ASTM C617). Utilizando una máquina de ensayo, las probetas se prueban aplicando una carga de conexión axial a una velocidad especificada de carga, hasta la fractura (Figura 7.30). La resistencia a la compresión de la probeta se determina dividiendo la carga máxima soportada por la probeta durante la prueba entre el área media de la sección transversal. El número de probetas y el número de lotes de prueba dependerá de las prácticas establecidas y de la naturaleza del programa de prueba. Normalmente, se prueban tres o más probetas para cada edad del hormigón y cada condición de prueba. Las edades del hormigón utilizadas normalmente para el hormigón son 7 y 28 días.

Observe que la probeta debe tener una relación altura–diámetro igual a dos. La razón principal de este requisito es eliminar el efecto terminal debido a la fricción entre las cabezas de carga y la probeta. De este modo, se puede garantizar que existe una zona

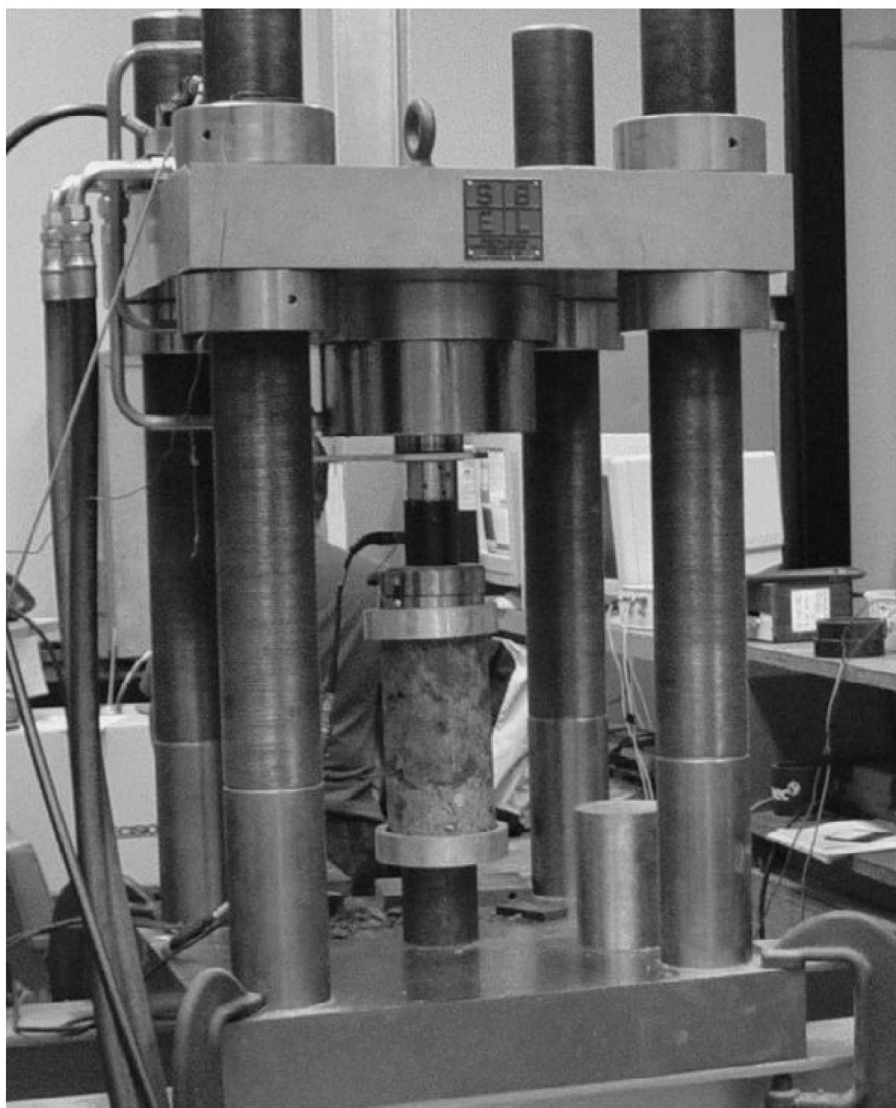


FIGURA 7.30 Prueba de resistencia a la compresión.

de compresión uniaxial dentro de la probeta. Si la relación altura–diámetro es dos, se puede aplicar un factor de corrección a los resultados, como se indica en ASTM C39.

La resistencia a la compresión de la probeta se ve afectada por el tamaño de la misma. Al incrementarse el tamaño se reduce la resistencia, porque en las probetas de mayor tamaño existe una probabilidad de que aparezcan elementos débiles, en los que dará comienzo la fractura. En general, las probetas de gran tamaño tienen una menor variabilidad y representan mejor la resistencia real del hormigón que las probetas pequeñas. Por ello, el tamaño de 0,15-m por 0,30-m (6 pulgadas por 12 pulgadas) es el tamaño de probeta más adecuado para determinar la resistencia a la compresión. Sin

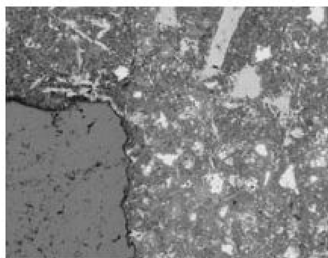


FIGURA 7.31 Imagen de microscopio electrónico de barrido que muestra la interfaz entre los granos de arena (esquina inferior izquierda) y la pasta de cemento.

embargo, algunas organizaciones utilizan probetas de 0,10 m (4 pulgadas) de diámetro por 0,20 m (8 pulgadas) de altura. Las ventajas de utilizar probetas más pequeñas son la mayor facilidad de manejo, la menor posibilidad de que se produzcan daños accidentales, la menor necesidad de hormigón, la capacidad de usar una máquina de pruebas de baja capacidad y el menor espacio requerido para el curado y el almacenamiento. Debido a la variabilidad de la resistencia en las probetas de pequeño tamaño, será necesario ensayar más probetas que si se emplean probetas de tamaño estándar. En algunos casos, se usan cinco probetas de 0,10 m por 0,20 m en lugar de las tres comúnmente utilizadas en el caso de probetas de tamaño normal. Asimismo, cuando se emplean probetas pequeñas, el ingeniero debe ser consciente de las limitaciones del ensayo y deberá tener en cuenta dichas limitaciones al interpretar los resultados.

La interfaz entre la pasta de cemento endurecido y las partículas de áridos suele ser el punto más débil del material de hormigón. Cuando se somete al hormigón a un esfuerzo por encima del rango elástico se desarrollan microfisuras en la interfaz entre la pasta de cemento y el árido, y estas microfisuras crecen de forma continua hasta que se produce la fractura. La Figura 7.31 muestra una micrografía ampliada por 500 de la superficie fracturada de un cilindro de mortero de cemento endurecido, obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido. La figura muestra las fracturas transcristalinas debidas a una dislocación de las partículas de arena. También pueden verse las microfisuras que se desarrollan alrededor de algunas partículas de arena durante la carga.

7.5.2 Prueba de compresión diametral

La prueba de compresión diametral (ASTM C496) mide la resistencia a la tracción del hormigón. En esta prueba se somete un cilindro de hormigón de 0,15 m por 0,30 m (6 pulgadas por 12 pulgadas) a una carga de compresión a velocidad constante según el diámetro vertical hasta que se produce la fractura, como se muestra en la Figura 7.32. La fractura de la probeta se traduce según su diámetro vertical debido a la tensión desarrollada en la dirección transversal. La resistencia de compresión diametral (resistencia indirecta de tracción) se calcula como

$$T = \frac{2P}{\pi L d} \tag{7.4}$$

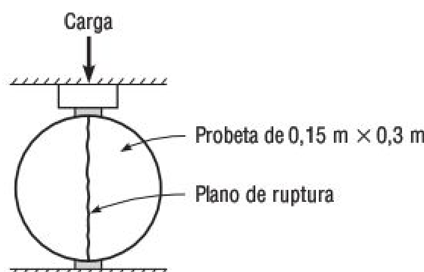


FIGURA 7.32 Prueba de compresión diametral.

donde

T = resistencia a la tracción, MPa (psi),
P = carga de fractura, N (psi),
L = longitud de la probeta, mm (pulgadas) y
d = diámetro de la probeta, mm (pulgadas).

Los valores típicos de la resistencia indirecta a la tracción del hormigón varían entre 2,5 MPa y 3,1 MPa (360 psi y 450 psi) (Neville, 1981). La resistencia a la tracción del hormigón es aproximadamente un 10% de su resistencia a la compresión.

7.5.3 Prueba de resistencia a la flexión

La prueba de resistencia a la flexión (ASTM C78) es importante para el diseño y la construcción de carreteras y pavimentos de hormigón para aeropuertos. La probeta se prepara en el laboratorio o a pie de obra de acuerdo con ASTM C192 o C31, respectivamente. Pueden utilizarse distintos tamaños de probeta. Sin embargo, la muestra debe tener una sección transversal cuadrada y una longitud igual a tres veces la profundidad de la probeta. Las dimensiones típicas son una sección transversal de 0,15 m por 0,15 m (6 pulgas por 6 pulgadas) y una longitud de 0,30 m (18 pulgadas). Después del encofrado, las probetas se mantienen dentro del encofrado durante las primeras 24 ± 8 horas, luego se extraen y se curan a 23 ± 1,7°C (73,4 ± 3°F) bien en agua saturada de cal o en una habitación con humedad controlada que tenga una humedad relativa del 95% o superior, hasta que se realizan las pruebas. A continuación, la probeta se coloca de lado y se centra en el aparato de carga mostrado en la Figura 7.33. La carga se aplica de forma continua a una velocidad especificada hasta que se produce la fractura. Si la fractura se inicia en la superficie correspondiente al tercio central del vano, la resistencia a la flexión (módulo de ruptura) se calcula mediante la fórmula:

$$R = \frac{Mc}{I} = \frac{PL}{bd^2} \tag{7.5}$$

donde

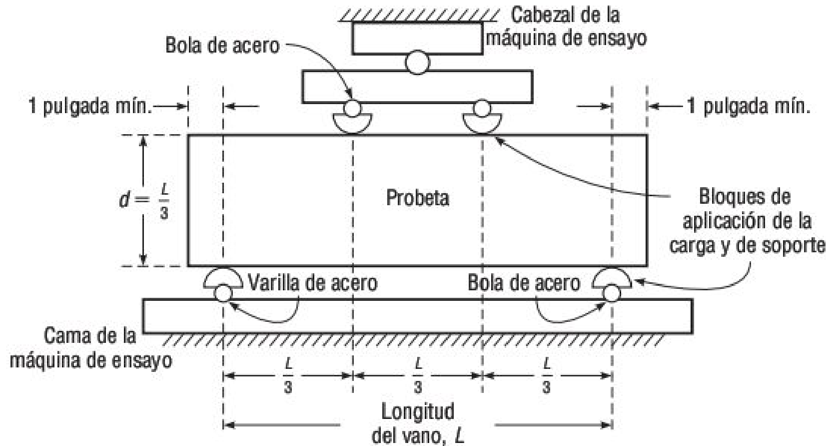


FIGURA 7.33 Aparato para pruebas de flexión del hormigón mediante el método de carga por tercios (ASTM C78). Copyright ASTM. reimpresa con su permiso.

R = resistencia a la flexión, MPa (psi),
M = momento flector máximo = $PL/6$, N.mm (libra.pulgada),
c = d/2, mm (pulgadas),
I = momento de inercia = $bh^3/12$, mm^4 (pulg.^{4}),
P = carga máxima aplicada, que se distribuye equitativamente (1/2 en cada uno) entre los dos puntos de carga, N (libra),
L = longitud del vano, mm (pulgadas),
b = anchura media de la probeta, mm (pulgadas) y
d = profundidad media de la probeta, mm (pulgadas).

Observe que la carga por tercios garantiza un momento flector constante, sin que se aplique ninguna fuerza cortante en el tercio medio de la probeta. De este modo, la Ecuación 7.5 será válida siempre que la fractura se produzca en el tercio medio de la probeta. Si la fractura tiene lugar ligeramente fuera del tercio medio, pueden seguir empleándose los resultados, pero con algunas correcciones. Si la fractura está muy alejada del tercio medio, los resultados se descartan.

Para el hormigón de peso normal, la resistencia a la flexión puede aproximarse como sigue:

$$R = (0{,}62 \text{ a } 0{,}83)\sqrt{f_c'} \qquad (7.6a)$$

$$R = (7{,}5 \text{ a } 10)\sqrt{f_c'} \qquad (7.6b)$$

La Ecuación 7.6a se utiliza para unidades del sistema internacional (SI), en cuyo caso tanto R como f'_c se expresan en MPa, mientras que la Ecuación 7.6b se usa para las unidades empleadas habitualmente en Estados Unidos, donde R y f' se especifican en psi.

7.5.4 Prueba con el esclerómetro

La prueba con el esclerómetro, también denominada prueba del martillo de Schmidt es una prueba no destructiva que se realiza sobre el hormigón endurecido para determinar la dureza de su superficie (Figura 7.34). La dureza de la superficie puede correlarse, hasta cierto puerto, con la resistencia del hormigón. El esclerómetro normalmente se emplea para obtener una indicación de la resistencia del hormigón. El dispositivo tiene unos 0,3 m (1 pie) de longitud e incluye una masa y un muelle. La masa conectada al muelle se libera para golpear la superficie del hormigón. La masa rebota y el grado de rebote se lee en una escala incorporada al dispositivo. Cuanto mayor sea el rebote, más dura será la superficie del hormigón y mayor será también la resistencia del mismo. El dispositivo suele incluir una serie de gráficas preparadas por el fabricante que relacionan el rebote con la resistencia. La prueba también puede utilizarse para comprobar la uniformidad de la superficie del hormigón.

La prueba es muy simple de realizar y está estandarizada en la norma ASTM C805. Para realizar la prueba, el aparato debe colocarse perpendicular a una superficie de hormigón suave y limpia. En algunos casos, puede que sea difícil satisfacer esta condición; sin embargo, pueden emplearse correlaciones, normalmente proporcionadas por el fabricante, para relacionar la resistencia con el grado de rebote a diferentes alturas. Los resultados del esclerómetro también se ven afectados por otros diversos factores, como las vibraciones locales, la existencia de partículas de árido grueso en la superficie y la existencia de huecos cerca de la superficie. Para reducir el efecto de estos factores, es deseable promediar entre 10 y 12 lecturas obtenidas en diferentes puntos del área sometida a ensayo.

7.5.5 Prueba de resistencia a la penetración

La prueba de resistencia a la penetración, también conocida con el nombre de prueba de la sonda de Windsor, está estandarizada por la norma ASTM C803. El instrumento (Figura 7.35) es un dispositivo de tipo pistola que dispara sondas contra la superficie



FIGURA 7.34 Esclerómetro para la evaluación no destructiva del hormigón endurecido.



FIGURA 7.35 Dispositivo para la prueba de la sonda de Windsor.

del hormigón para determinar su resistencia. El grado de penetración de la sonda en el hormigón guarda una relación inversa con la resistencia del mismo. La prueba es prácticamente no destructiva, ya que lo único que hace es crear pequeños agujeros en la superficie del hormigón.

El dispositivo está equipado con una plantilla especial con tres agujeros que se coloca sobre la superficie de hormigón. La prueba se realiza en cada uno de los agujeros. Se determina la media de la penetración de las tres sondas a través de estos agujeros, utilizando una escala y una placa especial. Es preciso tener cuidado a la hora de manejar el dispositivo para evitar daños. Como forma de mejorar la seguridad, el dispositivo no puede utilizarse sin apretar fuerte sobre la superficie del hormigón, lo que impide la realización de disparos accidentales. Normalmente, la prueba de la resistencia a la penetración proporciona mejores estimaciones de la resistencia que el esclerómetro, ya que la medida de la resistencia a la penetración no se hace solo en la superficie, sino que se prueba la muestra en profundidad.

7.5.6 Prueba de velocidad de pulsos ultrasónicos

La prueba de velocidad de pulsos ultrasónicos (ASTM C597) mide la velocidad de una onda ultrasónica que atraviesa el hormigón (Figura 7.36). En esta prueba, la distancia entre los transductores se divide entre el tiempo que tarda la onda en desplazarse entre ellos, lo que determina la velocidad media de propagación de la onda. Se ha intentado correlar los datos de la velocidad de los pulsos con los parámetros de resistencia del hormigón; sin embargo, no se han encontrado buenas correlaciones, ya que la relación entre los datos de los pulsos y los de resistencia está influenciada



FIGURA 7.36 Aparato para la medida de la velocidad de los pulsos ultrasónicos (Cortesía de James Instrument Inc.).

por una serie de variables, como la edad del hormigón, la relación árido–cemento, el tipo de árido, las condiciones de humedad y la ubicación de las barras de armadura (Mehta y Monteiro, 1993). Esta prueba se utiliza para detectar grietas, discontinuidades o deterioros internos en la estructura del hormigón.

7.5.7 Prueba de maduración

La maduración de una mezcla de hormigón se define como el grado de hidratación del cemento, el cual varía en función tanto del tiempo como de la temperatura. Por tanto, se asume que, para una mezcla de hormigón completa, la resistencia está en función del grado de maduración. Se han desarrollado medidores de maduración (Figura 7.37) para proporcionar una aproximación de la resistencia del hormigón, monitorizando la temperatura del hormigón a lo largo del tiempo. Esta prueba (ASTM C1074) se realiza sobre hormigón fresco durante varios días. El medidor de maduración debe calibrarse para cada mezcla de hormigón.

7.6 Alternativas al hormigón convencional

Hay varias alternativas que incrementan la flexibilidad y las aplicaciones del hormigón. Aunque una presentación técnica de los materiales para cada una de estas tecnologías queda fuera del alcance de este libro, el ingeniero debe ser consciente de algunos de los



FIGURA 7.37 Comprobación de la maduración del hormigón fresco con un medidor de maduración.

materiales utilizados para proporcionar capacidades adicionales al hormigón. Entre estas alternativas podemos citar:

Hormigón autoconsolidante
Relleno de fluido
Hormigón proyectado
Hormigón ligero
Hormigón de alta resistencia
Hormigón compensador de la contracción
Hormigón reforzado con fibra
Hormigón pesado
Polímeros y hormigón
Hormigón compactado a rodillo
Hormigón de altas prestaciones

7.6.1 Hormigón autoconsolidante

El hormigón autoconsolidante (SCC), también denominado hormigón autocompactante, es un hormigón altamente fluido, no segregante, que puede distribuirse en su lugar de colocación, rellenar el encofrado y encapsular la armadura, sin ningún tipo de consolidación mecánica (NRMCA). Algunas de las ventajas de emplear SCC son las siguientes:

1. Puede colocarse a mayor velocidad, sin vibración mecánica y con menos enrasado, lo que permite ahorrar en los costes de colocación.
2. Mejora y hace más uniforme el acabado de las superficies arquitectónicas, reduciendo o evitando la necesidad de retocarlas.

3. Facilita el rellenado de secciones restringidas y secciones de difícil acceso. Esto permite al diseñador crear formas estructurales y arquitectónicas que no se pueden conseguir con el hormigón convencional.
4. Mejora la consolidación alrededor de la armadura y mejora también la unión con la armadura.
5. Aumenta la facilidad de bombeo.

Dos propiedades importantes específicas del hormigón autoconsolidante en su estado plástico son su *fluidez* y su *estabilidad*. La alta fluidez del SCC se consigue utilizando aditivos reductores de agua de alta gama, sin añadir agua adicional a la mezcla. La estabilidad, o resistencia a la segregación, se consigue incrementando la cantidad de materiales finos y/o utilizando aditivos que modifican la viscosidad de la mezcla. Los materiales finos pueden ser materiales cementosos o minerales.

La prueba más común utilizada para medir la fluidez y la estabilidad del SCC es una versión modificada de la prueba de asentamiento, de la que ya hemos hablado anteriormente. En esta prueba de flujo de asentamiento, se rellena el cono de asentamiento completamente de hormigón sin consolidar. Después, se levanta el cono y se mide cuánto se ha distribuido el hormigón, como se muestra en la Figura 7.38. La fluidez se deduce a partir del grado de asentamiento. El asentamiento suele ser de entre 455 y 810 mm (18 y 32 pulgadas), dependiendo de los requisitos del proyecto. La resistencia a la segregación, o la estabilidad, se mide mediante el índice visual de estabilidad (VSI, *Visual Stability Index*). El VSI se establece según si se observa que el agua sangra en el borde del hormigón distribuido en la prueba de asentamiento o si los áridos se apilan en la parte central. Los valores del índice VSI varían entre cero para el hormigón "altamente estable" y tres para una estabilidad inaceptable.

Durante la prueba del flujo de asentamiento, puede medirse la viscosidad mediante la velocidad a la que el hormigón se distribuye. Se mide el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar un diámetro de 50 cm (20 pulgadas) desde el momento en el que se levanta el cono. Este tiempo se denomina T_{50} (T_{20}) y normalmente varía entre 2 y 10 segundos para el SCC. Un valor mayor de T_{50} (T_{20}) indica una mezcla más viscosa, que resultará más apropiada para el hormigón utilizado en aplicaciones con armaduras congestionadas o en secciones profundas. Un valor menor de T_{50} (T_{20}) puede ser más apropiado para el hormigón que tenga que desplazarse grandes distancias horizontales sin demasiada obstrucción.

7.6.2 Relleno fluido

El relleno fluido es un material cementoso autonivelante y autocompactante, con una resistencia a la compresión en estado no confinado igual a 8,3 MPa (1200 psi) o menor. El relleno fluido normalmente se utiliza como material de relleno en lugar del relleno granular compactado (Figura 7.39). El relleno fluido también se denomina comúnmente material controlado de baja resistencia (CLSM, *Controlled low-strength material*), relleno de densidad controlada (CDF, *Controlled Density Fill*), relleno fluido de compactación, relleno no contraíble, mortero de flujo y flujo de ceniza fina.



FIGURA 7.38 Medición del grado de distribución del cemento durante la prueba de flujo de asentamiento.



FIGURA 7.39 Llenado de un agujero con relleno fluido.

La mezcla de relleno fluido está compuesta de cemento, arena y agua normalmente mezclados con ceniza fina, escoria de horno alto granulada, GGBF (*Ground Granulated Blast Furnace*) y/o aditivos generadores de aire. El tipo y las proporciones de los ingre-

dientes utilizados para fabricar el relleno fluido permiten cambiar en gran medida sus propiedades para ajustarlas al uso que se pretenda dar al relleno.

Una de las propiedades distintivas del relleno fluido, que le hace que sea ventajoso comparado con el relleno granular compactado, es su fluidez. Las características de alta fluidez y de autonivelación permiten al relleno fluido rellenar los huecos y los espacios de difícil acceso que resulta imposible o difícil rellenar con el relleno granular compactado.

Cuando se coloca el relleno fluido en la cavidad, su volumen inicial se reduce ligeramente, del orden de 10 mm por metro (1/8 de pulgada por pie) de profundidad. Este fenómeno de asentamiento está provocado por el desplazamiento del agua y la liberación del aire atrapado, como resultado de la consolidación. Una vez endurecido el relleno fluido, ese asentamiento se detiene y el volumen ya no se modifica.

Pueden calcularse las proporciones del relleno fluido para disponer de un amplio rango de resistencias a la compresión. Sin embargo, las mezclas de relleno fluido más comúnmente utilizadas emplean proporciones que tienen en cuenta la posible excavación del hormigón en los años siguientes, y presentan un rango de resistencias a la compresión que va de 0,35 MPa a 1 MPa (50 a 150 psi). El relleno fluido con una resistencia a la compresión inferior a 150 psi puede excavarse manualmente, al mismo tiempo que exhibe una capacidad de soporte adecuada para admitir cargas externas, como el paso de un vehículo. El relleno fluido con resistencias ente 150 y 300 psi requerirá la utilización de equipos mecánicos para la excavación. Si la resistencia excede los 2 MPa (300 psi), el material no se considera excavable.

El relleno fluido presenta varias ventajas con respecto al relleno granular compactado. El relleno fluido no precisa compactación, que es una de las principales preocupaciones con el relleno granular. Asimismo, puede alcanzar ubicaciones inaccesibles, como los lugares alrededor de los conductos, a los que es difícil llegar con el relleno granular. El relleno fluido también tiene una capacidad mayor de soporte que el relleno granular compactado y no presenta un grado de asentamiento apreciable; puede incluso colocarse en aguas estancadas. Estas ventajas permiten reducir los costes de mano de obra y de equipos, así como ahorrar tiempo durante la construcción.

El relleno fluido suele utilizarse como relleno para zanjas de obras públicas, muros de contención, soleras de conductos y excavación de edificios. También se emplea como relleno estructural en suelos pobres, para la estabilización de pavimentos por inyección, para soporte de suelos y aceros, y para reformas de puentes. Otros usos de este tipo de relleno incluyen las bases de pavimentación, el control de erosión y el relleno de huecos. El relleno fluido se ha hecho más común en los últimos años y normalmente lo distribuyen los proveedores de cemento premezclado.

7.6.3 Cemento proyectado

El cemento proyectado es un mortero de hormigón de árido de pequeño tamaño que se proyecta a gran velocidad sobre una superficie (véanse las Figuras 7.40 y 7.41). El hormigón proyectado, también denominado hormigón "pulverizado" es una mezcla



FIGURA 7.40 Construcción de una piscina con hormigón proyectado.



FIGURA 7.41 Hormigón proyectado para el revestimiento de un túnel.

relativamente seca que se consolida mediante la fuerza de impacto y que puede colocarse sobre superficies horizontales o verticales sin desmoronamiento.

El hormigón proyectado se aplica mediante un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, una combinación premezclada de cemento y árido húmedo se impulsa a través de una manguera, que sale por la tobera gracias al aire comprimido, y es en esta tobera donde se añade el agua. En el proceso húmedo, todos los ingredientes están premezclados y se bombean a través de una manguera hasta la tobera utilizándose el aire comprimido para proyectar la mezcla sobre la superficie. En ambos casos, la tobera debe mantenerse perpendicular a la superficie para reducir los rebotes de las partículas de árido grueso en la superficie. La tobera se mantiene a una distancia de entre 0,5 a 1,5 m (1,5 a 5 pies) de la superficie.

Con el hormigón proyectado pueden utilizarse materiales cementosos suplementarios, como la ceniza fina y el humo de sílice, para mejorar la facilidad de trabajo, la resistencia a los productos químicos y la durabilidad. También pueden emplearse aditivos acelerantes para reducir el tiempo de fraguado inicial y para permitir que se acumulen capas gruesas de cemento proyectado en una sola pasada. También pueden emplearse armaduras de acero para mejorar la resistencia a la flexión, la ductilidad y la tenacidad (Kosmatka *et al.*, 2002).

7.6.4 Hormigón ligero

Los estudiantes que compiten en el concurso anual de canoas de hormigón de la ASCE suelen ser capaces de fabricar hormigón con un peso específico inferior al del agua. La *Guía ACI para el hormigón estructural de árido ligero* requiere una resistencia a la

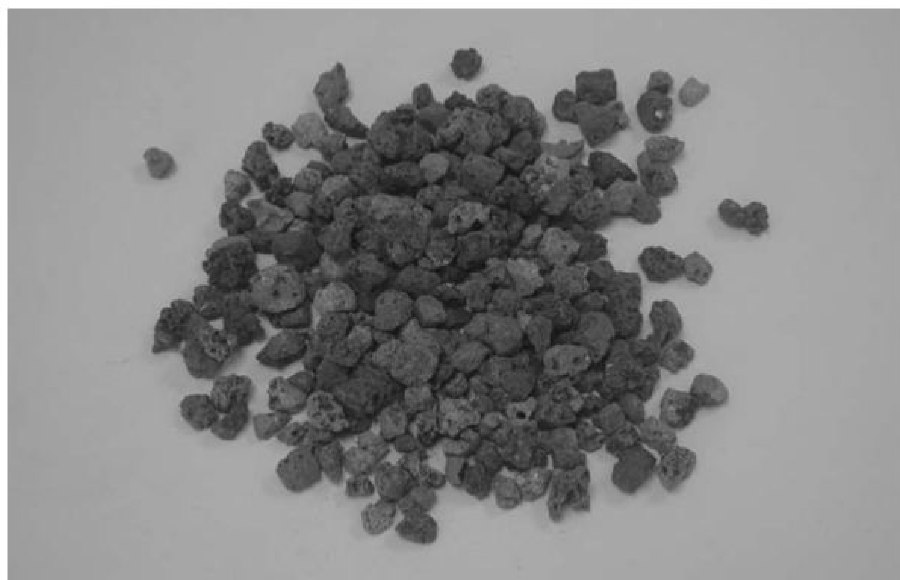


FIGURA 7.42 Áridos usados para el hormigón ligero.



FIGURA 7.43 Estudiantes de ASCE en la Universidad del Estado de Arizona fabricando una canoa de hormigón con hormigón ligero.

compresión a los 28 días de 17 MPa (2500 psi) y un peso específico en estado seco inferior a 1850 kg/m^3 (115 libras/pie^3) para el hormigón ligero estructural. El uso de hormigón ligero en una estructura, normalmente, se debe a consideraciones económicas; puede que el hormigón cueste más, pero su menor peso permite reducir los costes de cimentación y de la estructura.

Las proporciones de mezcla para el hormigón ligero deben compensar la naturaleza absorbente del árido. Generalmente, los áridos ligeros son altamente absorbentes y pueden continuar absorbiendo agua durante un largo periodo de tiempo (Figuras 7.42 y 7.43). Esto hace que resulte problemática la determinación de la relación agua–materiales cementosos. Además, los áridos ligeros tienden a segregarse flotando hasta la superficie. Para mitigar este efecto, se emplea una mezcla con un grado de asentamiento mínimo y con un agente de aireación.

También se han desarrollado agentes no estructurales de hormigón muy ligero. El hormigón hecho con "áridos" de espuma de estireno se ha empleado como aislante en la construcción de algunos edificios.

7.6.5 Hormigón pesado

Los apantallamientos biológicos utilizados en centrales nucleares, equipos médicos con tecnología nuclear e instalaciones de investigación y ensayo en el campo de la energía ató-



FIGURA 7.44 Acero utilizado como árido para el hormigón pesado.

mica requieren la utilización de muros masivos para confinar las radiaciones. El hormigón es un excelente material de apantallamiento. Para los apantallamientos biológicos, la masa del hormigón puede incrementarse utilizando áridos pesados, que pueden ser de origen natural y artificial. Entre los áridos pesados naturales se incluyen la barita, la magnetita, el hematites, la goetita, la ilmenita y el ferrofósforo. La gravedad específica de estos áridos está comprendida entre 3,4 y 6,5. El acero, con una gravedad específica de 7,8 (Figura 7.44), también puede utilizarse como árido para el hormigón pesado. Sin embargo, esa alta gravedad específica de los áridos hace que resulte problemático el trabajar con el hormigón pesado y hace también que aparezca un problema de segregación. La utilización de una más alta proporción de arena facilita el trabajo con el hormigón, aunque también dicha facilidad de trabajo puede conseguirse colocando primero los áridos y luego rellenando los huecos existentes entre las partículas de árido con una inyección de cemento, arena, agua y aditivos. La norma ASTM C637, *Especificaciones de los áridos para hormigón utilizado como pantalla antirradiación* y la norma ASTM C637, *Nomenclatura de los constituyentes de áridos para el hormigón utilizado como pantalla antirradiación* proporcionan más información sobre las prácticas relativas al hormigón pesado.

7.6.6 Hormigón de alta resistencia

El hormigón hecho con áridos de peso normal y resistencias a la compresión mayores que 40 MPa (6000 psi) se considera hormigón de alta resistencia. La producción de hormigón con una resistencia a la compresión superior a 40 MPa requiere una cuidadosa definición de las proporciones de los componentes y un adecuado control de calidad durante la construcción. La microestructura del hormigón con resistencia a la compresión por encima de 40 MPa es considerablemente distinta de la del hormigón convencional. En particular, la porosidad de la pasta de cemento y la zona de transición comprendida entre la pasta de cemento y el árido son los factores principales que controlan el desarrollo de una alta resistencia. Esta porosidad está regulada por la relación agua–materiales cementosos. El desarrollo de superplastificantes ha permitido desarrollar hormigón de alta resistencia fácil de trabajar y que es fluido para bajas relaciones

agua–materiales cementosos. Además, el hormigón de alta resistencia presenta una excelente durabilidad debido a su densa estructura de poros. En Estados Unidos, el hormigón de alta resistencia se utiliza principalmente para rascacielos. La alta resistencia y el correspondiente alto módulo de elasticidad permiten reducir el tamaño de los elementos estructurales.

7.6.7 Hormigón compensador de la contracción

El hormigón normal se contrae en las etapas tempranas, especialmente si no está adecuadamente curado, como ya hemos explicado en este capítulo. La adición de alúmina en polvo al cemento puede hacer que el hormigón se expanda en las etapas tempranas. Este tipo de cemento compensador de la contracción se comercializa con la etiqueta de cemento de tipo K. Las propiedades expansivas de este cemento pueden aprovecharse restringiendo la expansión del hormigón, bien mediante una armadura o por otros medios, en las etapas tempranas. Cuando el hormigón así constreñido trata de expandirse, se desarrollan esfuerzos de compresión, que tienden a compensar los esfuerzos de tracción generados por la contracción de secado. De este modo, se reduce la posibilidad de que el hormigón se agriete debido a dicha contracción. Los detalles relativos al diseño y uso del hormigón compensador de la contracción están disponibles en el informe del Comité 233 del ACI titulado *Recomendaciones para el uso de cementos compensadores de la contracción.*

7.6.8 Polímeros y hormigón

Los polímeros pueden utilizarse de diversas formas en la producción de hormigón. El polímero puede usarse como único agente aglomerante, para generar *hormigón polimérico*. Los polímeros también pueden mezclarse con el hormigón en estado plástico para obtener *hormigón polimérico de cemento portland*. Asimismo, los polímeros pueden aplicarse al hormigón endurecido para obtener lo que se conoce con el nombre de *hormigón con impregnación polimérica*.

El hormigón polimérico es una mezcla de áridos y un polímero aglutinante. Existe una amplia variedad de polímeros que pueden mezclarse con áridos para obtener hormigón polimérico. Algunos de ellos pueden emplearse para obtener hormigón de fraguado rápido, que puede ponerse en servicio en menos de una hora después de su colocación. Otros utilizan fórmulas diseñadas para obtener una alta resistencia, siendo posible obtener valores de hasta 140 MPa (20.000 psi). Otros presentan una buena resistencia a los ataques químicos. Una característica común es que la mayoría de los hormigones poliméricos son muy caros, lo que limita su aplicación a situaciones en las que sus características distintivas hacen del hormigón polimérico una alternativa eficiente al hormigón convencional en términos de coste.

El hormigón polimérico de cemento portland incorpora un polímero en la producción del hormigón de cemento portland tradicional. Ese polímero generalmente es una emulsión elastomérica, como el látex.

7.6.9 Hormigón reforzado con fibra

La naturaleza frágil del hormigón se debe a la rápida propagación de microfisuras al aplicar una tensión. Sin embargo, con el hormigón reforzado con fibra, la fractura se produce a causa de la separación de la fibra y el hormigón. A diferencia del hormigón normal, el reforzado con fibra puede continuar sosteniendo una carga después del agrietamiento inicial, lo que hace que aumente en la práctica la tenacidad del material. Además, la resistencia a la flexión del hormigón aumenta hasta en un 30%. Para obtener más información acerca del diseño y las aplicaciones del hormigón reforzado con fibra, consulte la *Guía ACI para la especificación, el mezclado, la colocación y acabado del hormigón reforzado con fibra de acero.*

Las fibras están disponibles en diversos tamaños, formas y materiales (Figura 7.45). Las fibras pueden estar hechas de acero, plástico, vidrio y materiales naturales, aunque las más comunes son las de acero. La forma de las fibras generalmente se describe mediante la relación de aspecto longitud/diámetro. Las fibras de acero normalmente tienen diámetros comprendidos entre 0,25 mm y 0,9 mm (0,01 y 0,035 pulgadas) con relaciones de aspecto de entre 30 y 150. Los diámetros de los elementos de fibra de vidrio van de 0,013 mm a 1,3 mm (0,005 a 0,05 pulgadas).

La adición de fibras al hormigón reduce la facilidad de trabajo con él. El grado de reducción depende de la relación de aspecto de las fibras y de la concentración en volumen de las mismas. Generalmente, debido a problemas de construcción, la utilización de fibra está limitada a un máximo del 2% del volumen de la mezcla. Los aditivos pueden restaurar parte de la facilidad de trabajo con el hormigón mezclado.

Puesto que la adición de fibras no incrementa enormemente la resistencia del hormigón, su uso en elementos estructurales es limitado. En vigas, pilares, suelos suspendidos, etc., debe utilizarse una armadura convencional para poder soportar la carga total de tracción. Sin embargo, el hormigón reforzado con fibra sí se ha empleado con éxito para losas de suelo, pavimentos, estabilización de pendientes y revestimiento de túneles.



FIGURA 7.45 Fibras utilizadas en el hormigón reforzado con fibra.

7.6.10 Hormigón compactado a rodillo

Basándose en las necesidades características del hormigón en masa utilizado en la construcción de presas, se desarrolló hace tiempo el hormigón compactado a rodillo (RCC, *Roller-Compacted Concrete*). Este material utiliza un factor de cemento relativamente bajo, tiene requisitos granulométricos menos estrictos y su contenido de agua se ha seleccionado teniendo en cuenta las consideraciones de construcción más que la resistencia. RCC es un hormigón sin asentamiento, que se transporta, coloca y compacta con equipos especializados en la construcción de presas terrestres y escolleras. El RCC se transporta en camiones volquete, se distribuye mediante bulldozers y se compacta con compactadores vibratorios. La experiencias japonesas en el uso de RRC en la construcción han permitido constatar las siguientes ventajas:

1. La mezcla es económica debido al bajo contenido de cemento.
2. Los encofrados son mínimos gracias al método de construcción por capas.
3. El bajo factor de cemento limita el calor de hidratación, reduciendo la necesidad de enfriar de forma externa la estructura.
4. Los costes de colocación son inferiores a los de los métodos utilizados para el hormigón convencional, debido al uso de equipos de alta capacidad y a la rápida velocidad de colocación.
5. El periodo de construcción es más corto que con el hormigón convencional.

Además, la experiencia en Estados Unidos ha demostrado que los costes de materiales con el RCC son aproximadamente un tercio de los costes derivados del uso de hormigón convencional. Las dos aplicaciones principales del RCC han sido, hasta el momento, la construcción de presas y de grandes áreas pavimentadas, como las pistas de aparcamiento para tanques militares.

7.6.11 Hormigón de altas prestaciones

Aunque las especificaciones actuales del hormigón han permitido disponer de un material con unas prestaciones razonablemente buenas, existe la preocupación de que el énfasis puesto en la resistencia durante el proceso de diseño de las mezclas haya terminado por conducir a la utilización de un hormigón que resulta inadecuado en lo referente a otras características del material. Esto ha llevado a que aparezca un interés en el desarrollo de especificaciones y métodos de diseño para lo que se ha denominado *hormigón de altas prestaciones* (HPC, *High-Performance Concrete*). El Instituto americano del hormigón (ACI) define el HPC como un hormigón que satisface requisitos especiales de prestaciones y uniformidad, los cuales no siempre se pueden obtener con los ingredientes convencionales, los procedimientos normales de mezcla y las prácticas típicas de curado. Estos requisitos pueden incluir las siguientes mejoras:

Facilidad de colocación y compactación.
Propiedades mecánicas a largo plazo.
Resistencia en las etapas tempranas.

Tenacidad.
Estabilidad de volumen.
Vida útil ampliada en entornos severos.

Estas características mejoradas pueden conseguirse alterando la granulometría de los áridos, incluyendo aditivos especiales y mejorando las prácticas de mezcla y colocación. Actualmente, puede obtenerse una resistencia a la comprensión de entre 70 y 175 MPa (10.000 y 25.000 psi). A medida que la necesidad de utilizar HPC sea mejor comprendida y adoptada por la comunidad de ingenieros, probablemente se produzca una transición en las especificaciones del hormigón, pasando del actual método prescriptivo a otras especificaciones basadas en las prestaciones o relacionadas con las mismas. Un estudio del programa de investigación estratégica (SHRP) americano (Zia *et al.*, 1991) definía el HPC mediante las siguientes características:

Relación agua–materiales cementosos máxima de 0,35;
Factor mínimo de durabilidad del 80%, determinado según la norma ASTM C 666, Procedimiento A y
Criterio de resistencia mínima, que puede ser uno de los tres siguientes:

a. 21 MPa (3.000 psi) a las cuatro horas de la colocación: resistencia muy temprana, (VES, *Very Early Strength*),
b. 34 MPa (5.000 psi) a las 24 horas de la colocación: alta resistencia temprana (HES, *High Early Strength*), o
c. 69 MPa (10.000 psi) a los 28 días de la colocación: muy alta resistencia (VHS, *Very High Strength*).

De este modo, el hormigón de altas prestaciones está caracterizado por un comportamiento especial tanto a corto como a largo plazo y por una uniformidad en ese comportamiento (Nawy, 1996). Dichos requisitos no siempre pueden conseguirse utilizando únicamente materiales convencionales o aplicando prácticas convencionales. Puesto que el hormigón es el material de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo, las nuevas construcciones con hormigón tienen que emplear las nuevas tecnologías actualmente disponibles para eliminar las costosas rehabilitaciones futuras.

En las tres últimas décadas se han desarrollado nuevos y revolucionarios materiales de construcción, así como modificaciones y mejoras en el comportamiento de los materiales tradicionales. Estos desarrollos se han visto considerablemente facilitados por un mayor conocimiento de la estructura molecular de los materiales, por el estudio de las fracturas a largo plazo, por el desarrollo de técnicas más poderosas de instrumentación y monitorización y por la necesidad de disponer de materiales más resistentes y con mejores prestaciones, que resulten adecuados para estructuras de gran tamaño y vanos más largos, y que presenten una mayor ductilidad.

A pesar de los actuales avances en la tecnología del hormigón y del desarrollo de hormigones de altas prestaciones, se espera que la industria del hormigón continúe avanzando gracias al desarrollo de nuevos componentes y aditivos, a los estudios microestructurales, a las composiciones de cemento mezcladas, a la utilización de mejo-

res técnicas de selección y dosificación de materiales y al desarrollo de técnicas más eficientes de colocación.

RESUMEN

El diseño de materiales de hormigón de cemento portland duraderos es responsabilidad directa de los ingenieros civiles. La selección de las adecuadas proporciones de cemento portland, agua, áridos y aditivos, junto con unas buenas prácticas de construcción, determina la calidad del hormigón empleado en las aplicaciones estructurales. El método de diseño de mezclas volumétrico presentado en este capítulo permite obtener hormigón con la resistencia y durabilidad requeridas. Sin embargo, el adecuado diseño del hormigón de cemento portland es irrelevante a menos que se utilicen procedimientos de construcción adecuados, lo que incluye la mezcla, transporte, colocación y curado apropiados del hormigón. Para garantizar que estos procesos produzcan hormigón con las propiedades deseadas, los ingenieros civiles llevan a cabo diversos ensayos de control de calidad, incluyendo pruebas de asentamiento, pruebas de contenido de aire y pruebas de determinación de la ganancia de resistencia en función del tiempo.

Aunque la inmensa mayoría de los proyectos con hormigón se llevan a cabo con materiales convencionales, existen diversas formulaciones alternativas importantes del hormigón, que están disponibles para aplicaciones especiales. En este capítulo se han presentado dichas alternativas; sin embargo, la tecnología asociada con ellas es relativamente compleja, por lo que será necesario realizar un estudio adicional para comprender el comportamiento de estos materiales.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

7.1 El ingeniero de diseño especifica una resistencia del hormigón de 5500 psi. Determine el valor medio requerido de la resistencia a la compresión de:
   a. Una nueva planta donde s se desconoce.
   b. Una planta de fabricación con s = 500 psi para 22 resultados de prueba.
   c. Una planta con un largo historial de producción de hormigón con s = 400 psi.
   d. Una planta con un largo historial de producción de hormigón con s = 600 psi.

7.2 Un proyecto especifica una resistencia del hormigón de 24,1 MPa. Los ingenieros de materiales diseñarán la mezcla de modo que se obtenga una resistencia superior a esta, para tener en cuenta las variabilidades.

a. Calcule el valor medio requerido de resistencia a la compresión del diseño de la mezcla, si la planta de mezclado tiene una desviación estándar de $s = 3{,}8$ MPa.
b. Utilizando la ecuación del código ACI, estime cuál será el módulo de elasticidad de este hormigón para la resistencia a la compresión *requerida.*

7.3 Un proyecto especifica una resistencia del hormigón de al menos 3000 psi. Los ingenieros de materiales diseñarán la mezcla para obtener una resistencia mayor que esa. Calcule el valor medio de la resistencia a la compresión en el diseño de la mezcla si la desviación estándar es $s = 350$ psi. Estime el módulo de elasticidad del hormigón para ese valor medio requerido de resistencia a la compresión (la resistencia calculada, no la resistencia dada).

7.4 ¿Cuál sería su recomendación para el tamaño máximo nominal del árido grueso en la siguiente situación?
Una sección transversal de un pavimento de hormigón con armadura continua contiene una capa de barras de armadura Nº 6 con 6 pulgadas entre centros, de modo que el acero está justo por encima del punto central de una losa de 10 pulgadas de espesor. La cubierta por encima de la parte superior del acero es por tanto de unas 4 pulgadas.

7.5 Una mezcla de hormigón con un grado de asentamiento de 3 pulgadas, una relación agua-cemento de 0,50 y una arena con un módulo de finura de 2,4 contiene 1.700 libras de árido grueso. Calcule el peso requerido de árido grueso por yarda cúbica. Para ajustar la mezcla con el fin de incrementar la resistencia a la compresión, la relación agua-cemento se reduce a 0,45. ¿La cantidad de árido grueso se incrementará, se reducirá o continuará siendo la misma? Explique su respuesta.

7.6 Está trabajando en un diseño de una mezcla de hormigón que requiere que cada yarda cúbica de hormigón tenga una relación agua-materiales cementosos de 0,45, 1.963 libras/yd^3 de grava seca, un 4% de contenido de aire y 565 libras/pie^3 de cemento. La grava disponible tiene una gravedad específica de $G_{grava} = 2{,}7$, un grado de humedad del 1,6% y una absorción del 2,4%. La arena disponible tiene una gravedad específica de $G_{arena} = 2{,}5$, un grado de humedad del 4,8% y una absorción del 1,5%. Para cada yarda cúbica de hormigón necesaria para el trabajo, calcule los pesos de cemento, grava húmeda, arena húmeda y agua que hay que añadir al lote. Elabore un resumen y totalice el diseño de la mezcla cuando haya acabado (no incluya agentes de aireación en el resumen).

7.7 Diseñe un mezcla de hormigón de acuerdo con las siguientes condiciones:

Entorno de diseño
Armazón de un edificio
Resistencia de diseño requerida = 27,6 MPa
Dimensión mínima = 150 mm
Distancia mínima entre las barras de armadura = 40 mm
Recubrimiento mínimo entre las barras de armadura = 40 mm

Los datos estadísticos indican una desviación estándar de la resistencia a la compresión de 2,1 MPa (más de 30 muestras).
Solo se permite usar un agente de aireación.
Materiales disponibles
Agente de aireación: especificación del fabricante 6,3 ml/1% aire/100 kg cemento.
Árido grueso: tamaño máximo 19 mm, grava de río (redondeada)
Gravedad específica en estado seco = 2,55; Absorción = 0,3%
Densidad en estado apisonado y seco = 1761 kg/m^3
Grado de humedad = 2,5%
Árido fino: arena natural
Gravedad específica en estado seco = 2,659; Absorción = 0,5%
Grado de humedad = 2%
Módulo de finura = 2,47

7.8. Diseñe una mezcla de hormigón de acuerdo con las siguientes especificaciones:
Entorno de diseño
Losa de pavimento en una región de clima frío.
Resistencia de diseño requerida = 3.000 psi,
Espesor de la losa = 12 pulgadas,
Los datos estadísticos indican una desviación estándar de la resistencia a la compresión de 250 psi (más de 30 muestras).
Solo se permite usar un agente de aireación.
Materiales disponibles
Agente de aireación: especificación del fabricante 0,15 onzas liq./1% aire/100 libra cemento.
Árido grueso: tamaño máximo 2 pulgadas, grava triturada (angular)
Gravedad específica en estado seco = 2,573; Absorción = 0,1%
Densidad en estado apisonado y seco = 120 libras/pie^3
Grado de humedad = 1%
Árido fino: arena natural
Gravedad específica en estado seco = 2,54; Absorción = 0,2%
Grado de humedad = 3,67%
Módulo de finura = 2,68

7.9 El diseño de una mezcla de hormigón requiere 1.173 kg/m^3 de grava en estado seco, 582 kg/m^3 de arena en estado seco y 157 kg/m^3 de agua libre. La grava disponible en la obra tiene un grado de humedad del 0,8% y una absorción del 1,5%, y la arena disponible tiene un grado de humedad del 1,1% y una absorción del 1,3%. ¿Cuáles son las masas de grava, arena y agua por metro cúbico que hay que utilizar en esta obra?

7.10 Diseñe una mezcla de hormigón no aireado para una obra pequeña con un tamaño máximo de grava de 25 mm (1 pulgada). Proporcione los resultados de la siguiente forma:

a. masa de los componentes para producir 2.000 kg (4.400 libras) de hormigón.
b. volúmenes de los componentes para producir 1 m^3 (36 $pies^3$) de hormigón.

7.11 Diseñe una mezcla de hormigón no aireado para una obra pequeña con un tamaño máximo de grava de 3/4 de pulgada. Proporcione los resultados de la forma siguiente:
a. pesos de los componentes para producir 5000 libras de hormigón.
b. volúmenes de los componentes para producir 1 yd^3 de hormigón.

7.12 ¿Por qué es necesario medir el contenido de aire del hormigón en la obra, en lugar de en la planta de dosificación? Indique uno de los métodos utilizados para medir el contenido de aire del hormigón.

7.13 ¿Qué queremos decir al hablar de curado del hormigón? ¿Qué sucedería si no se curara el hormigón?

7.14 Cite cinco métodos distintos de curado del hormigón.

7.15 Explique el fenómeno del cambio de volumen del hormigón en las etapas tempranas.

7.16 Explique la respuesta de reptación de las estructuras de hormigón. Proporcione ejemplos del efecto de la reptación sobre dichas estructuras.

7.17 En una gráfica, dibuje una curva que muestre la relación típica entre el esfuerzo y la deformación de una serie de probetas de hormigón con relaciones agua–materiales cementosos altas y bajas. Etiquete todos los ejes y curvas. Comente cuál es el efecto de incrementar la relación agua–materiales cementosos sobre la curva de respuesta esfuerzo–deformación.

7.18 Utilizando la Figura 7.29,
a. Determine el esfuerzo máximo para cada valor de la relación agua–materiales cementosos.
b. Determine el módulo secante para un 40% del esfuerzo máximo y para cada valor de la relación agua–materiales cementosos.
c. Dibuje la relación entre los módulos de secante y los esfuerzos máximos.
d. Dibuje la relación entre los módulos y los esfuerzos máximos en la misma gráfica del apartado (c), utilizando la relación del Código de construcción ACI (Ecuación 7.3).
e. Compare las dos relaciones y comente cualquier discrepancia que encuentre.

7.19 Un hormigón de peso normal tiene una resistencia media a la compresión igual a 4500 psi. ¿Cuál es el módulo de elasticidad estimado?

7.20 Explique la importancia de la prueba de la resistencia a la compresión en el hormigón. Dibuje una gráfica para mostrar la relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua–materiales cementosos para diferentes tiempos de curado (etiquete todos los ejes y curvas).

7.21 ¿Cuál es el tamaño estándar de las probetas PCC para las pruebas de la resistencia a la compresión? Si se utiliza un tamaño menor, ¿qué tamaño mostrará una

mayor resistencia a la compresión? ¿Por qué? ¿Qué tamaño proporciona resistencias más próximas a las de una estructura real de hormigón?

7.22 Se desea construir un pilar normal de hormigón de corta longitud, con dimensiones de 12 pulg. $\times$ 12 pulg. $\times$ 36 pulg. Si la resistencia a la compresión del hormigón es de 5000 psi, ¿cuál será la máxima carga que puede aplicarse a este pilar aplicando un factor de seguridad de 1,2?

7.23 ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de flexión en el hormigón? ¿Cómo se relacionan los resultados de este ensayo con los de la prueba de resistencia a la compresión?

7.24 ¿Cuáles son las ventajas de utilizar un ensayo de medida de la flexión por el método de carga por tercios frente al método de carga en el punto central? Dibuje un diagrama de la fuerza cortante y un diagrama del momento flector para cada uno de los casos, para así justificar su respuesta.

7.25 Considere una probeta estándar en términos de resistencia a la flexión con una longitud L, una anchura a y una altura a. Suponga que se utiliza el método de carga por tercios y que la carga de fractura obtenida después de usar la máquina de prueba es P, estando esa carga distribuida uniformemente (1/2 en cada uno) entre los dos puntos de carga. Deduzca la ecuación para calcular el módulo de ruptura de la viga en función de P, L y a.

7.26 Se realiza una prueba de resistencia a la flexión en una viga de hormigón que tiene una sección transversal de 0,15 m por 0,15 m y un vano de 0,45 m. Si la carga de fractura es de 35,7 kN, calcule la resistencia a la flexión del hormigón.

7.27 Un hormigón de peso normal tiene una resistencia media a la compresión de 20 MPa. ¿Cuál será la resistencia estimada a la flexión?

7.28 Explique dos ensayos no destructivos que puedan realizarse con el hormigón endurecido. Indique los principios básicos que subyacen a cada uno de esos ensayos y explique cómo se realizan.

7.29 Explique el concepto de medidores de la maduración del hormigón.

7.30 Exponga cuatro alternativas que permitan incrementar el uso y la aplicación del hormigón convencional.

7.31 ¿Qué es el hormigón autoconsolidante? ¿Cómo se consiguen sus propiedades? ¿Cómo se miden esas propiedades?

7.32 ¿Qué es el relleno fluido? Indique sus ingredientes y sus ventajas.

7.33 Explique el concepto de hormigón de altas prestaciones. Indique algunas de sus propiedades que hacen que sea preferible al hormigón convencional.

7.34 Comparando el PCC con el acero dulce, responda a las siguientes cuestiones:

a. ¿Cuál de ellos es más fuerte?
b. ¿Cuál tiene un mayor módulo de rigidez?
c. ¿Cuál es más frágil?
d. ¿Cuál es el rango típico de resistencia a la compresión del PCC?
e. ¿Cuál es la resistencia a la compresión de un hormigón de alta resistencia?

f. ¿Cuál sería un rango razonable para el módulo del PCC?

7.35 En una planta de fabricación de hormigón premezclado se preparan periódicamente una serie de muestras cilíndricas y se someten a ensayo para detectar posibles problemas en las mezclas y para garantizar que la resistencia a la compresión supere el límite inferior especificado. El valor objetivo mínimo está establecido en 4000 psi. Al realizar esas pruebas, se obtienen los siguientes datos.

Muestra Nº	Resistencia a la compresión (psi)	Muestra Nº	Resistencia a la compresión (psi)
1	4.914	14	5.772
2	4.732	15	4.270
3	5.670	16	5.096
4	4.310	17	4.670
5	6.110	18	5.174
6	4.316	19	5.434
7	5.240	20	3.692
8	4.950	21	4.510
9	5.230	22	3.680
10	4.190	23	4.100
11	5.770	24	3.680
12	4.524	25	3.910
13	4.056		

a. Calcule la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los datos.
b. Utilizando un programa de hoja de cálculo, cree un diagrama de control para estos datos en el que muestren el valor objetivo y el límite inferior especificado. ¿Satisface la producción de la planta los requisitos especificados? Si no es así, comente las posibles razones. Comente la dispersión de los datos.

7.7 Referencias

American Concrete Institute. Specifications for Structural Concrete. ACI Committee 301 Report, ACI 301–99. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1999.

American Concrete Institute. *Guide for Concrete Floor and Slab Construction.* ACI Committee 302 Report, ACI 302.1R-96. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1996.

American Concrete Institute. *Hot-Weather Concreting*. ACI Committee 305 Report, ACI 305R-99. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1999.

American Concrete Institute. *Cold-Weather Concreting*. ACI Committee 306 Report, ACI 306R-88. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1997.

American Concrete Institute. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*. ACI Committee 211 Report, ACI 211.1–91. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1991.

American Concrete Institute. *Standard Practice for Curing Concrete*. ACI Committee 308 Report, ACI 308–92. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1997.

American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. ACI Committee 318 Report, ACI 318–99. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1999.

Hognestad, E., N. W. Hanson y D. McHenry. *Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design*. Development Department Bulletin DX006. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1955.

Kosmatka, S. H., B. Kerkhoff y W. C. Panarese. *Design and Control of Concrete Mixtures*. Decimocuarta edición. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.

Mehta, P. K. y P. J. M. Monteiro. *Concrete Structure, Properties, and Materials*. Segunda edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.

National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). Concrete in Practice, CIP 37, "Self Consolidating Concrete". Silver Springs, MD: NRMCA, www.nrmca.org

National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). "Flowable Fill Materials". Silver Spring, MD: NRMCA, www.nrmca.org

Nawy, E. G. *Fundamentals of High Strength High Performance Concrete*, Concrete Design and Construction Series. Harlow, UK: Longman Group Limited, 1996.

Neville, A. M. *Properties of Concrete*. Tercera edición. Londres: Pitman Books Ltd, 1981.

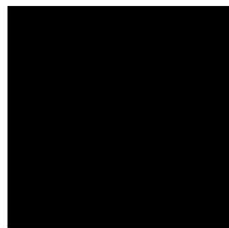
Portland Cement Association. *Concrete for Small Jobs*. IS174 T, 1988. Skokie, IL: Portland Cement Association,http://www.portcement.org/pdf_files/IS174

Powers, T. C., L. E. Copeland, J. C. Hayes y H. M. Mann. Permeability of portland cement paste. *Journal of American Concrete Institute* 51 (11) 285–298, Nov. 1954.

Shah, S. P. y G. Winter. Inelastic Behavior and Fracture of Concrete. *Symposium on Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete*. American Concrete Institute Special Publication no. 20. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1968.

Zia, P., M.L. Leming y S.H. Ahmad. *High Performance Concretes: A State-of-the-Art Report*. SHRP-C/FR-91-103, Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1991. ttp://www.tfhrc.gov/structur/hpc/hpc2/exec.htm

8



MAMPOSTERÍA

Una estructura de mampostería se forma combinando elementos de mampostería, como piedra o ladrillo, con mortero. La mampostería es uno de los materiales de construcción más antiguos. Entre los ejemplos de estructuras antiguas de mampostería podemos citar las pirámides de Egipto, la Gran Muralla China y numerosas ruinas griegas y romanas. Los ladrillos de tamaño prácticamente uniforme se utilizaban ya comúnmente en Europa a principios del siglo XIII. El ladrillo comenzó a utilizarse extensivamente en Estados Unidos alrededor del año 1600. En los dos últimos siglos, los ladrillos se han utilizado en la construcción de alcantarillas, de pilares de puentes, de revestimientos de túneles y de edificios de varios pisos. Los elementos de mampostería (Figura 8.1) se siguen empleando en la construcción en todo el mundo occidental y compiten con otros materiales como la madera, el acero y el hormigón (Adams, 1979).

8.1 Elementos de mampostería

Los elementos de mampostería pueden clasificarse como:

- Elementos de mampostería de hormigón.
- Ladrillos de arcilla.
- Ladrillos de construcción.
- Ladrillos de vidrio.
- Piedra.

Los elementos de mampostería de hormigón pueden ser sólidos o huecos, pero los ladrillos de arcilla, de construcción, de vidrio y la piedra son normalmente sólidos. La única excepción son los ladrillos estructurales, que son elementos huecos de mayor tamaño que los ladrillos de arcilla convencionales y se utilizan para mampostería ligera, como muros de partición y paneles. Pueden utilizarse disponiendo el ladrillo en dirección horizontal o vertical. La Figura 8.2 muestra ejemplos de elementos de mampostería de hormigón, ladrillos convencionales de arcilla y ladrillos

de construcción. Los elementos de mampostería de hormigón y los ladrillos de arcilla se utilizan habitualmente en todo el mundo occidental.

8.1.1 Elementos de mampostería de hormigón

Los elementos de hormigón sólidos se suelen denominar ladrillos de hormigón, mientras que los elementos huecos se conocen como bloques de hormigón. Los elementos huecos tienen un área de sección transversal neta en cada plano paralelo a la superficie de soporte de carga inferior al 75% del área de sección transversal teórica. Si esta relación es del 75% o superior, el elemento se considera sólido (Asociación del cemento portland, PCA, 1991).



FIGURA 8.1 Elementos de mampostería utilizados en la construcción.

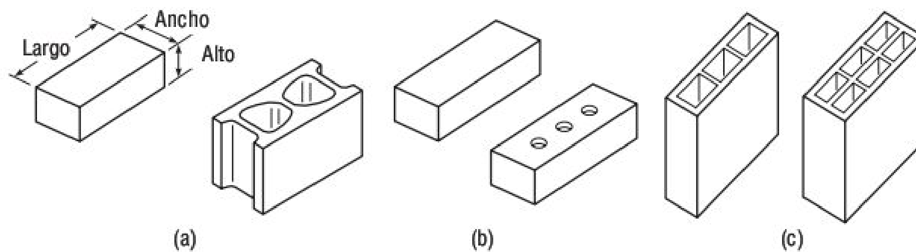


FIGURA 8.2 Ejemplos de elementos de mampostería: (a) elementos de mampostería de hormigón, (b) ladrillos de arcilla convencionales y (c) ladrillos de construcción.

Los elementos de mampostería se fabrican en tres clases en función de su densidad: *elementos ligeros, elementos de peso medio* y *elementos de peso normal,* siendo el peso de los elementos en seco el mostrado en la Tabla 8.1. Para fabricar las unidades de peso normal se utiliza arena, grava y piedras trituradas de granulometría correcta. Para fabricar las unidades ligeras se emplean áridos ligeros como la piedra pómez, escoria, cenizas, arcillas expandidas y esquistos expandidos. Los elementos ligeros son los más comúnmente utilizados en mampostería hoy en día, porque son fáciles de manejar y transportar, y el peso de la estructura se reduce. Los elementos ligeros tienen propiedades térmicas e ignífugas mejores que las unidades de peso normal, aunque su resistencia es menor.

Los elementos de mampostería de hormigón se fabrican utilizando una mezcla relativamente seca (asentamiento cero) de hormigón, compuesta por cemento portland, áridos, agua y aditivos. Normalmente, para fabricar estos elementos se emplea cemento de Tipo I, aunque a veces se usa el de Tipo III para reducir el tiempo de curado. En ocasiones, se usa también hormigón aireado para incrementar la resistencia de la estructura de mampostería de cara a los efectos de la congelación y la descongelación, así como para mejorar la facilidad de trabajo, la compactación y las características de encofrado de los elementos durante la fabricación. Los elementos se moldean bajo presión y luego se curan, empleando normalmente un método de curado a baja presión. Después de la fabricación, los elementos se almacenan bajo condiciones controladas, de modo que el hormigón continúe su proceso de curado.

Los elementos de mampostería de hormigón pueden clasificarse como de carga (ASTM C90) y de no carga (ASTM C129). Los elementos de carga deben satisfacer unos requisitos mínimos de resistencia a la compresión mayores que los elementos de no carga, como se muestra en la Tabla 8.2. La resistencia a la compresión de los elementos individuales de mampostería de hormigón se determina refrentando el elemento y aplicando una carga en la dirección de su altura, hasta que se produce la fractura (ASTM C140). Se recomienda utilizar un elemento completo para las pruebas, aunque también puede utilizarse una parte del mismo si la capacidad de la máquina de prueba no es lo suficientemente grande. La *resistencia a la compresión/área total* se calcula dividiendo la carga de fractura entre el área de sección transversal total de la unidad. La *resisten-*

TABLA 8.1 Clasificaciones de pesos y absorción máxima permitida de agua en los elementos de mampostería de hormigón (ASTM C90 y C129) (Copyright ASTM, reimpreso con su permiso).

Clasificación por peso	Peso específico, Mg/m^3 (lb/pie^3)	Absorción máxima de agua, kg/m^3 (lb/pie^3) (media de 3 unidades)
Ligero	1,68 (105)	288 (18)
Peso medio	1,68–2,00 (105–125)	240 (15)
Peso normal	2,00 (125) o más	208 (13)

TABLA 8.2 Requisitos de resistencia de los elementos de mampostería de hormigón (ASTM C90 y C129).

	Resistencia mínima a la compresión basada en el área neta, MPa (psi)	
Tipo	**Media de tres elementos**	**Elementos individuales**
De carga	13,1 (1900)	11,7 (1700)
De no carga	4,1 (600)	3,5 (500)

cia a la compresión/área neta se calcula dividiendo la carga de fractura entre el área de sección transversal neta, que a su vez se determina dividiendo el volumen neto del elemento entre su altura media. El volumen neto se calcula empleando el método de desplazamiento de agua de acuerdo con ASTM C140.

Problema de ejemplo 8.1

Un elemento de mampostería de hormigón hueco tiene unas dimensiones totales de 7-5/8 pulgadas × 7-5/8 pulgadas × 15-5/8 pulgadas. Se prueba en una máquina de compresión obteniéndose los siguientes resultados:

Carga de fractura = 250 kips

Volumen neto = 366,9 pulgadas^3

a. Calcule la resistencia a la compresión/área total.
b. Calcule la resistencia a la compresión/área neta.

Solución

a. Área total = 7,625 × 15,625 = 119,141 pulgadas^3
   Resistencia a la compresión/área total = 250.000/119,141 = 2.098,4 psi
b. Área neta = 366,9/7,625 = 48,118 pulgadas^2
   Resistencia a la compresión/área neta = 250.000/48,118 = 5.196,6 psi

El grado de absorción de agua de los elementos de mampostería de hormigón está controlado por estándares ASTM, para reducir el efecto de la meteorización y limitar el grado de contracción debido a la pérdida de humedad después de la construcción (ASTM C90). La absorción de los elementos de mampostería de hormigón se determina sumergiendo el elemento en agua durante 24 horas (ASTM C140). La absorción y el grado de humedad se calculan de la forma siguiente:

$$\text{Absorción (kg/m}^3) = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \times 1000 \tag{8.1}$$

$$\text{Absorción (libra/pie}^3) = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \times 62{,}4 \tag{8.2}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \tag{8.3}$$

$$\text{Grado de humedad como porcentaje de la absorción total} = \frac{W_r - W_d}{W_s - W_d} \times 100 \tag{8.4}$$

donde

W_s = peso saturado de la probeta, kg (libra)
W_d = peso seco del elemento, kg (libra),
W_i = peso sumergido de la probeta, kg (libra) y
W_r = peso de la probeta en recepción

La Tabla 8.1 muestra la absorción máxima admisible de agua para los elementos de carga de mampostería de hormigón.

Problema de ejemplo 8.2

Se prueba un elemento de mampostería de hormigón de acuerdo con el procedimiento ASTM C140, obteniendo los siguientes resultados:

Masa del elemento en recepción = 10.354 g
Masa saturada del elemento = 11.089 g
Masa en seco del elemento = 9893 g

Calcule la absorción y el grado de humedad del elemento como porcentaje de la absorción total.

Solución

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{11{,}089 - 9893}{9893} \times 100 = 12{,}1\%$$

$$\text{Grado de humedad como porcentaje de la absorción total} = \frac{(10{,}354 - 9893)}{(11{,}089 - 9893)} \times 100 = 38{,}5\%$$

Los elementos de mampostería de hormigón están disponibles en diferentes tamaños, colores, formas y texturas. Se especifican de acuerdo con sus dimensiones nominales. La *dimensión nominal* es mayor que la dimensión *especificada* (o *modular*), siendo esa diferencia igual al espesor de la punta de mortero, que normalmente es de 10 mm (3/8 pulgadas). Por ejemplo, un bloque de 200 mm × 200 mm × 400 mm (8 pulgadas × 8 pulgadas × 16 pulgadas) tiene una anchura real de 190 mm (7-5/8 pulgadas), una altura de 190 mm (7-5/8 pulgadas) y una longitud de 390 mm (15-5/8 pulgadas), como se ilustra en la Figura 8.3. Los elementos de carga de mampostería de hormigón están disponibles

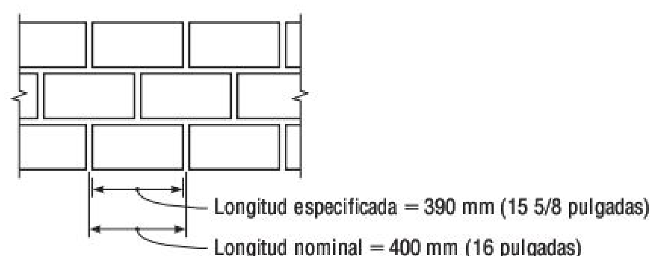


FIGURA 8.3 Dimensiones nominales y dimensiones especificadas (modulares).

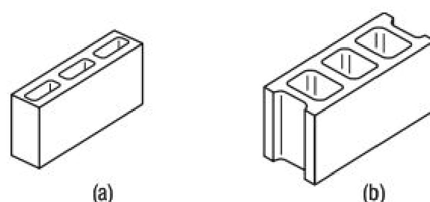


FIGURA 8.4 Elementos de mampostería de hormigón: (a) de no carga y (b) de carga.

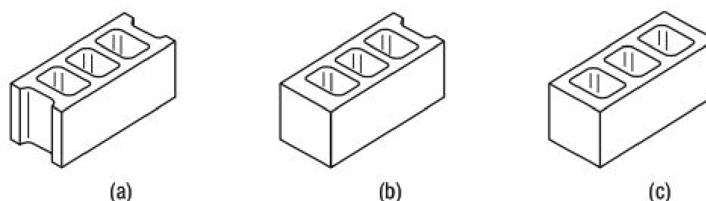


FIGURA 8.5 Elementos de mampostería de hormigón: (a) sin terminación, (b) de terminación simple y (c) de doble terminación.

con anchuras nominales de 100, 150, 200, 250 y 300 mm (4, 6, 8, 10 y 12 pulgadas), alturas de 100 y 200 mm (4 y 8 pulgadas) y longitudes de 300, 400 y 600 mm (12, 16 y 24 pulgadas). Los bloques de carga comunes son de 200 mm × 200 mm × 400 mm, mientras que los bloques de no carga son de 100 mm × 200 mm × 400 mm, como se muestra en la Figura 8.4. Asimismo, dependiendo de la posición dentro de la pared de mampostería, se fabrican como elementos sin terminación, con terminación simple y con doble terminación, como se puede ver en la Figura 8.5.

Los elementos de mampostería de hormigón sólidos (ladrillos de hormigón) se fabrican en dos calidades (N y S), según los requisitos de resistencia y de absorción. Los elementos de calidad N presentan una mayor resistencia a la compresión, una mayor resistencia a la penetración de humedad y una mayor resistencia a la acción del hielo que los de calidad S. De acuerdo con ASTM C55, la resistencia mínima a la compresión de los elementos individuales es igual a 20,7 MPa (3000 psi) para la calidad N y a 13,8 MPa (2000 psi) para la calidad S. Los ladrillos de calidad N se utilizan típicamente

como revestimiento arquitectónico y como elementos de cara vista en paredes exteriores. Los ladrillos de calidad S son de uso general, para los casos en los que se requieran una resistencia a la compresión, una resistencia a la acción del hielo y una resistencia a la penetración de humedad moderadas.

8.1.2 Ladrillos de arcilla sólidos

Los ladrillos de arcilla son bloques rectangulares de pequeño tamaño fabricados con arcilla cocida. Las arcillas empleadas para la fabricación de ladrillos varían ampliamente en cuanto a su composición entre un lugar y otro. Las arcillas están compuestas principalmente por silicio (gránulos de arena), alúmina, cal, hierro, manganeso, azufre y fosfatos, en diferentes proporciones. El ladrillo se fabrica moliendo o triturando la arcilla y mezcládola con agua, para dotarla de una consistencia plástica. Esa arcilla plástica se moldea, se textura y se seca y, finalmente, se cuece. Los ladrillos se fabrican en diferentes colores, como rojo oscuro, púrpura, marrón, gris, rosa o marrón claro, dependiendo de la temperatura de cocido durante la fabricación. La temperatura de cocido para la fabricación de ladrillos varía desde 900°C a 1200°C (1650°F a 2200°F). Los ladrillos de arcilla tienen una densidad media de 2 Mg/m^3 (125 $libra/pie^3$).

Los ladrillos se emplean para diferentes propósitos, incluyendo la construcción de edificios, el revestimiento y acabado y la construcción de suelos y pavimentos. Los *ladrillos de construcción* se utilizan como material estructural y normalmente son fuertes y duraderos. Los *ladrillos de cara vista* se usan para revestimientos y con fines estéticos, y están disponibles en distintos tamaños, colores y texturas. Los *ladrillos de suelo* se emplean para superficies de suelo acabadas y suelen ser suaves y densos, además de tener una alta resistencia a la abrasión. Por último, los *ladrillos de adoquinado* se emplean como material de pavimentación para carreteras, aceras, patios y suelos interiores. Los ladrillos de adoquinado están disponibles en diferentes colores, como rojo, gris o marrón, y normalmente son resistentes a la abrasión y pueden estar vitrificados.

La absorción es una de las propiedades más importantes que determina la durabilidad de los ladrillos. Los ladrillos altamente absorbentes pueden provocar que aparezcan eflorescencias u otros problemas en las construcciones de mampostería. De acuerdo con ASTM C67, la absorción por inmersión durante 24 horas, la absorción por ebullición durante cinco horas y el coeficiente de saturación se calculan como sigue:

$$\text{Absorción por inmersión durante 24 horas (\%)} = \frac{\left(W_{s24} - W_d\right)}{W_d} \times 100 \quad (8.5)$$

$$\text{Absorción por ebullición durante 5 horas (\%)} = \frac{\left(W_{b5} - W_d\right)}{W_d} \times 100 \quad (8.6)$$

$$\text{Coeficiente de saturación} = \frac{\left(W_{s24} - W_d\right)}{\left(W_{b5} - W_d\right)} \quad (8.7)$$

donde

W_d = Peso seco de la probeta,
W_{s24} = Peso saturado después de 24 horas de inmersión en agua fría, y
W_{b5} = Peso saturado después de cinco horas de inmersión en agua en ebullición.

Los ladrillos de arcilla son muy duraderos, ignífugos y requieren muy poco mantenimiento. Presentan propiedades aislantes moderadas, lo que hace que las casas de ladrillo sean más frías en verano y más cálidas en invierno, si se comparan con las casas fabricadas con otros materiales de construcción. Los ladrillos de arcilla son, asimismo, no combustibles y malos conductores.

La resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla es una propiedad mecánica importante que controla su capacidad de soporte de cargas y su durabilidad. La resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla depende de la composición de la arcilla, del método de fabricación del ladrillo y del grado de cocción. La resistencia a la compresión se determina refrentando y probando medio elemento dispuesto de forma "plana" (la carga se aplica en la dirección de la altura del elemento) y se calcula dividiendo la carga de fractura entre el área de sección transversal (ASTM C67). Al determinar la resistencia a la compresión se emplea el área de sección transversal neta o total. El área de sección transversal neta solo se utiliza si dicha sección neta es inferior al 75% de la sección total. Puede emplearse para el ensayo un cuarto de ladrillo si la capacidad de la máquina de pruebas no es suficientemente grande como para poder probar medio ladrillo. Otras propiedades mecánicas de los ladrillos que también se pueden determinar mediante ensayo son el módulo de ruptura, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad. La mayoría de los ladrillos de arcilla presentan módulos de ruptura de entre 3,5 MPa y 26,2 MPa (500 psi y 3800 psi). El valor de la resistencia a la tracción está típicamente entre un 30% y un 49% del módulo de ruptura. El módulo de elasticidad está comprendido entre 10,3 GPa y 34,5 GPa ($1,5 \times 10^6$ y 5×10^6).

Los ladrillos sólidos para la construcción de edificios se clasifican de acuerdo con las propiedades relativas a su durabilidad y su resistencia a la meteorización, como por ejemplo la resistencia a la compresión, la absorción de agua y el coeficiente de saturación (ASTM C62). La Tabla 8.3 muestra las tres calidades disponibles y sus requisitos: SW, MW y NW, que hacen referencia a meteorización severa (SW), meteorización moderada (MW) y meteorización despreciable (NW). Los ladrillos de calidad SW están pensados para utilizarlos en zonas sujetas a la acción del hielo, especialmente al nivel del suelo o por debajo del mismo. Los ladrillos de calidad NW se recomiendan para zonas en las que no se produzcan heladas y en lugares secos, aun cuando puedan experimentarse temperaturas por debajo de la de congelación. Los ladrillos de calidad NW se pueden utilizar en la construcción de paredes interiores, donde no se espere que se produzcan heladas. Observe que a medida que las condiciones de meteorización se hacen más severas, hace falta una mayor resistencia a la compresión, una menor absorción de agua y un menor coeficiente de saturación, para reducir el efecto de los ciclos de congelación y descongelación, y de humectación y secado.

Los ladrillos de cara vista (ASTM C216) se fabrican con dos calidades distintas de durabilidad para meteorización severa (SW) y meteorización moderada (MW). Cada una

TABLA 8.3 Requisitos físicos para ladrillos sólidos de construcción (ASTM C62) (Copyright ASTM, reimpreso con su permiso).

	Resistencia mínima a la compresión, área total, MPa (psi)		Absorción de agua máxima por ebullición durante 5 horas, %		Coeficiente máximo de saturación	
Calidad	**Media de cinco ladrillos**	**Individual**	**Media de cinco ladrillos**	**Individual**	**Media de cinco ladrillos**	**Individual**
SW[1]	20,7 (3000)	17,2 (2500)	17,0	20,0	0,78	0,80
MW[2]	17,2 (2500)	15,2 (2200)	22,0	25,0	0,88	0,90
NW[3]	10,3 (1500)	8,6 (1250)	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite

[1] Meteorización severa.
[2] Meteorización moderada.
[3] Meteorización despreciable.

de estas calidades se fabrica con tres tipos de apariencia: FBS, FBX y FBA, que son *ladrillos de cara vista estándar, ladrillos de cara vista extra* y *ladrillos de cara vista arquitectónicos*. Los ladrillos de tipo FBS se utilizan para la construcción de mamposterías expuestas. Los de tipo FBX se emplean para construcción de mampostería general de exterior e interior cuando hace falta un alto grado de presión y la variación máxima admisible de tamaño sea baja. Los ladrillos de tipo FBA se fabrican para obtener efectos arquitectónicos característicos, resultantes de la no uniformidad en tamaño y textura de los elementos individuales.

Problema de ejemplo 8.3

Se realiza una prueba de ebullición durante cinco horas sobre un ladrillo de arcilla para meteorización media de acuerdo con ASTM C67, obteniendo las siguientes masas:

Masa seca de la probeta = 1,788 kg

Masa saturada después de sumergida durante cinco horas en agua ebullición = 2,262 kg

Calcule el porcentaje de absorción para ebullición durante cinco horas y compruebe si el ladrillo satisface los requisitos marcados por ASTM.

Solución

$$\text{Absorción para ebullición durante cinco horas} = \frac{2{,}262 - 1{,}788}{1{,}788} \times 100 = 26{,}5\%$$

De acuerdo con la Tabla 8.3, la absorción máxima permisible por ebullición durante cinco horas es del 25%. Por tanto, el ladrillo no satisface los requisitos de ASTM.

■

De forma similar a los elementos de mampostería de hormigón, los ladrillos se designan mediante sus dimensiones nominales. La *dimensión nominal* del ladrillo es mayor que su dimensión *especificada* (o *modular*), siendo esa diferencia la correspondiente al espesor de la junta de mortero, que es aproximadamente de 10 mm (3/8 pulgadas) y puede llegar a 12,5 mm (1/2 pulgada). El *tamaño real* del ladrillo depende del tamaño nominal y del grado de contracción que se produce durante el proceso de cocción, que varía entre el 4% y el 15%.

Los ladrillos de arcilla se especifican indicando su anchura nominal, su altura nominal y su longitud nominal. Por ejemplo, un ladrillo de 4 × 2-2/3 × 8 tiene una anchura nominal de 100 mm (4 pulgadas), una altura de 70 mm (2-2/3 pulgadas) y una longitud de 200 mm (8 pulgadas). Estos ladrillos están disponibles con anchuras nominales que van de 75 mm a 300 mm (3 a 12 pulgadas), alturas de 50 mm a 200 mm (2 a 8 pulgadas) y longitudes de hasta 400 mm (16 pulgadas). Los ladrillos pueden clasificarse como modulares o no modulares, teniendo los ladrillos modulares anchuras y longitudes que son múltiplos de 100 mm (4 pulgadas).

8.2 Mortero

El mortero es una mezcla de cemento portland, cal, arena y agua. La adición de un pequeño porcentaje de cal al mortero de cemento, hace que ese mortero se "enriquezca", facilitando el trabajo con el mismo. El mortero puede clasificarse como mortero de cal o mortero de cemento. El *mortero de cal* está compuesto por cal, arena y agua, mientras que el *mortero de cemento* (o de *cemento–cal*) está formado por mortero de cal mezclado con cemento portland (Asociación del cemento Portland, PCA 1987).

El mortero se utiliza para las siguientes funciones:

- Unir los elementos de mampostería.
- Servir como material de asentamiento para dichos elementos.
- Nivelar y asentar los elementos.
- Proporcionar cualidades estéticas a la estructura.

El mortero de cal gana resistencia lentamente, teniendo una resistencia típica a la compresión de entre 0,7 MPa y 2,8 MPa (100 psi y 400 psi). El mortero de cemento se fabrica en cuatro tipos: M, S, N y O. El tipo M contiene la menor cantidad de cal hidratada, mientras que el tipo O contiene la mayor cantidad. La resistencia a la compresión del mortero se prueba utilizando cubos de 50 mm de acuerdo con ASTM C109. Los valores mínimos medios de resistencia a la compresión para los tipos M, S, N y O a los 28 días son 17,2 MPa, 12,4 MPa, 5,2 MPa y 2,4 MPa (2500 psi, 1800 psi, 750 psi y 350 psi) (ASTM C270).

El mortero comienza a unir los elementos de mampostería en cuanto fragua. Durante la construcción, los ladrillos y bloques deben frotarse y presionarse para hacer que el mortero entre en los poros de los elementos de mampostería con el fin de conseguir una adhesión máxima entre los mismos. Sin embargo, hay que observar que el mortero es la parte más débil de la pared de mampostería. Por tanto, las capas de mortero finas suelen dar como resultado paredes más fuertes que las gruesas.

A diferencia del hormigón, la resistencia a la compresión no es la propiedad más importante del mortero. Puesto que el mortero se utiliza como adhesivo y como sellante, es muy importante que forme una unión completa, fuerte y duradera con los elementos de mampostería y con las barras de armadura que puedan utilizarse para reforzar las paredes de mampostería. La capacidad de unir los elementos individuales se mide mediante la *resistencia a la tracción de la unión* del mortero (ASTM C952), que está relacionada con la fuerza requerida para separar los elementos. La resistencia a la tracción de la unión afecta a la resistencia cortante y de flexión de los elementos de mampostería. La resistencia a la tracción de la unión normalmente varía entre 0,14 MPa y 0,55 MPa (20 psi y 80 psi) y se ve influenciada por la cantidad de cal existente en la mezcla.

Otras propiedades importantes del mortero son la facilidad de trabajo, la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión, la resistencia a la congelación y la descongelación, y la retención de agua. La retención de agua es una medida, de acuerdo con ASTM C91, de la velocidad con la que los elementos de mampostería pierden agua.

8.3 Lechada de cemento

La lechada de cemento es un hormigón con un alto grado de asentamiento, compuesto por cemento portland, arena, grava fina, agua y, en ocasiones, cal. Se utiliza para rellenar los huecos entre elementos de mampostería, con el propósito de (1) unir dichos elementos, (2) unir el acero de armadura a la mampostería, (3) incrementar el área de carga, (4) incrementar las propiedades ignífugas y (5) mejorar la resistencia al volcado al incrementar el peso. La resistencia a la compresión de la lechada de cemento suele ser de aproximadamente 14 MPa (2000 psi) a los 28 días.

8.4 Enlucido

El enlucido es una mezcla fluida de cemento portland, cal, arena y agua, que se utiliza para realizar el acabado de paredes de mampostería o de madera. Se emplea para paredes tanto de interior como de exterior. El estuco es un enlucido que se utiliza para cubrir paredes exteriores. La resistencia media a la compresión del enlucido es de unos 13,8 MPa (2000 psi) a los 28 días.

RESUMEN

La mampostería es una de las técnicas de construcción más antiguas, remontándose su uso a la utilización de bloques de adobe secados al sol en la Antigüedad. Los elementos modernos de mampostería se fabrican aplicando estándares de calidad estrictos durante el proceso de fabricación. Mientras que la resistencia de los elementos de mampostería es importante para el control de calidad, la resistencia de las construcciones de mampostería suele estar limitada por la capacidad de unir entre sí los elementos con mortero. La capacidad de los elementos de mampostería para resistir la degradación debida a las condiciones ambientales es una de las consideraciones de calidad más importantes. Esta capacidad está estrechamente relacionada con la absorción de los elementos de mampostería.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

8.1 Defina los elementos de mampostería sólidos y huecos de acuerdo con la norma ASTM C90.

8.2 ¿Cuáles son las ventajas de las paredes de mampostería con respecto a las de madera?

8.3 Se prueba un elemento de mampostería de hormigón para determinar su resistencia a la compresión, obteniendo los siguientes resultados:

Carga de fractura = 593 kN
Área total = 0,074 m^2
Volumen total = 0,014 m^3
Volumen neto = 0,006 m^3

¿Este elemento se clasificará como sólido o como hueco? ¿Por qué? ¿Cuál es su resistencia a la compresión? ¿Satisface la resistencia a la compresión los requisitos de ASTM para los elementos de carga mostrados en la Tabla 8.2?

8.4 Se prueba medio bloque de un elemento de mampostería de hormigón para determinar su resistencia a la compresión. Las dimensiones exteriores de la probeta son 7,5" × 7,5"× 7,5". La sección transversal es un cuadrado hueco con un espesor de pared de 1 pulgada. La carga se aplica perpendicularmente a la sección transversal hueca y la carga máxima es de 46.216 libras.
a. Determine la resistencia a la compresión/área total.
b. Determine la resistencia a la compresión/área neta.

8.5 Un elemento de mampostería de hormigón tiene unas dimensiones totales de 7-5/8" × 7-5/8"× 7-5/8". El elemento se prueba en una máquina de compresión, obteniéndose los siguientes resultados:

Carga de fractura = 110 kips
Volumen neto = 366,2 pulgadas^2

a. ¿Cómo se clasifica este elemento, como sólido o como hueco?
b. Calcule la resistencia a la compresión/área total.
c. Calcule la resistencia a la compresión/área neta.

8.6 Se somete medio bloque de un elemento de mampostería de hormigón a una prueba de compresión hasta fractura. Las dimensiones exteriores de la probeta son 190 mm × 190 mm × 190 mm. La sección transversal es un cuadrado hueco con un espesor de pared de 38 mm. La carga se aplica perpendicularmente a la sección transversal hueca y la carga máxima es igual a 217 kN.
a. Determine la resistencia a la compresión/área total.
b. Determine la resistencia a la compresión/área neta.

8.7 Un elemento de mampostería de hormigón hueco y simétrico, con un área de sección transversal como la mostrada en la Figura P8.7, se somete a una prueba de resistencia a la compresión. La carga de compresión de fractura es de 412 KN. ¿Cuál será la resistencia a la compresión en MPa?

8.8 Un elemento de mampostería de hormigón tiene unas dimensiones totales de 7-5/8" × 7-5/8"× 7-5/8". El elemento se prueba en una máquina de compresión y se obtienen los resultados siguientes:

Carga máxima de fractura = 83 kips
Volumen neto = 312,7 pulgadas^3

a. ¿Cómo se clasifica este elemento, como sólido o como hueco? ¿Por qué?
b. Calcule la resistencia a la compresión/área total.
c. Calcule la resistencia a la compresión/área neta.

8.9 a. ¿Por qué es importante que los elementos de mampostería de hormigón cumplan determinados requisitos de absorción?
b. Se prueba una parte de un elemento de mampostería de hormigón para ver su grado de absorción y su grado de humedad, obteniendo los siguientes pesos:

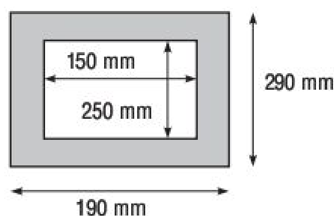


FIGURA P8.7

Peso del elemento en recepción = 3,605 libras
Peso saturado del elemento = 3,939 libras
Peso en seco del elemento = 3,524 libras
Peso en inmersión del elemento = 1,684 libras

Calcule la absorción en libras/pie^3 y el grado de humedad del elemento como un porcentaje de la absorción total. ¿Cumple la absorción el requisito marcado por la norma ASTM C90?

8.10 Se somete una parte de un elemento de mampostería de hormigón de peso medio a una prueba para determinar la absorción y el grado de humedad, obteniendo los siguientes pesos:

Peso del elemento en recepción = 5435 g
Peso saturado del elemento = 5776 g
Peso en seco del elemento = 5091 g
Peso en inmersión del elemento = 2973 g

Calcule la absorción en kg/m^3 y el grado de humedad del elemento como un porcentaje de la absorción total. ¿Cumple la absorción el requisito marcado por la norma ASTM C90?

8.11 Se somete una parte de un elemento de mampostería de hormigón a una prueba para determinar la absorción y el grado de humedad de acuerdo con el procedimiento ASTM C140, obteniendo los siguientes resultados:

Masa del elemento en recepción = 7805 g
Masa saturada del elemento = 8223 g
Masa en seco del elemento = 7684 g
Masa en inmersión del elemento = 4027 g

Determine:
a. Porcentaje de absorción.
b. Grado de humedad del elemento como porcentaje de la absorción total.
c. Densidad.
d. Clasificación de peso de acuerdo con ASTM C90 (ligero, medio o normal).

8.12 Se prueba un elemento de mampostería de hormigón de acuerdo con el procedimiento ASTM C140, obteniendo los siguientes resultados:

Masa del elemento en recepción = 8271 g
Masa saturada del elemento = 8652 g
Masa en seco del elemento = 7781 g

Para este elemento, calcule (a) la absorción en porcentaje y (b) grado de humedad como porcentaje de la absorción.

8.13 Defina los conceptos de dimensión nominal, especificada (modular) y real de los ladrillos de arcilla.

8.14 Enumere y defina las tres calidades de ladrillos de arcilla.

8.15 Se prueba un ladrillo de arcilla para meteorización severa, con el fin de determinar su absorción y el coeficiente de saturación de acuerdo con el procedimiento ASTM C67, y se obtienen los siguientes resultados:

Peso seco de la probeta = 1,822 kg
Peso saturado después de 24 horas de inmersión en agua fría = 2,044 kg
Peso saturado después de cinco horas en agua en ebullición = 2,060 kg

Calcule la absorción para inmersión durante 24 horas, la absorción por ebullición durante cinco horas y el coeficiente de saturación. ¿Satisface el ladrillo los requisitos marcados por ASTM?

8.16 ¿Cuáles son las funciones del mortero?

8.5 Referencias

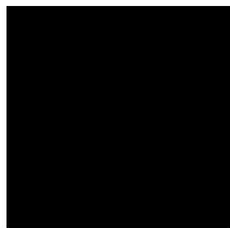
Adams, J. T. *The Complete Concrete, Masonry and Brick Handbook.* Nueva York: Arco, 1979.

Portland Cement Association. *Mortars for Masonry Walls.* Skokie, IL: Portland Cement Association, 1987.

Portland Cement Association. *Masonry Information.* Skokie, IL: Portland Cement Association, 1991.

Somayaji, S. *Civil Engineering Materials.* Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

9



AGLOMERANTES ASFÁLTICOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

El asfalto es uno de los materiales más antiguos usados en la construcción. Los aglomerantes asfálticos se utilizaban ya en el año 3000 a.c., precediendo al uso de la rueda en unos 1000 años. Antes de mediados de la década de 1850, el asfalto se extraía de depósitos naturales que se encontraban distribuidos por diversos lugares de todo el mundo, como el asfalto del lago Trinidad, que continúa extrayéndose hoy día. Sin embargo, con el descubrimiento y el refinado de petróleo en Pensilvania, el uso del cemento asfáltico comenzó a generalizarse. En 1907, ya se utilizaba más cemento asfáltico procedente de las refinerías que de depósitos naturales. Actualmente, prácticamente todo el cemento asfáltico se obtiene a partir de petróleo refinado.

Los materiales bituminosos se clasifican en asfaltos y alquitranes, como se muestra en la Figura 9.1. Los diversos productos asfálticos tienen distintos usos; el asfalto se usa principalmente en la construcción de pavimentos, aunque también se emplea como agente sellante e impermeabilizante. Las alquitranes se producen mediante la destilación destructiva de hulla bituminosa o por la desintegración de vapores de petróleo. En Estados Unidos, el alquitrán se usa principalmente para membranas impermeabilizantes, como por ejemplo en tejados. El alquitrán también puede emplearse para el tratamiento de pavimentos, especialmente allí donde los vertidos de fuel puedan disolver el cemento asfáltico, como en el caso de aparcamientos y pistas de aeropuertos.

El proceso de destilación fraccionada del petróleo crudo se ilustra en la Figura 9.2. Los distintos productos se separan a diferentes temperaturas. La Figura 9.2 muestra los productos principales, como la gasolina, el queroseno, el diesel, junto con el residuo asfáltico (cemento asfáltico). Puesto que el asfalto es un producto de menor valor que los otros componentes, las refinerías se diseñan para producir los combustibles más valiosos a expensas de la producción de asfalto. La cantidad y calidad del asfalto depende de la fuente de petróleo crudo y del método de refinado utilizado. Algunas fuen-

tes de crudo, como los petróleos nigerianos producen poco asfalto, mientras que otras, como muchos de los de Oriente Medio, tienen un alto contenido en asfalto.

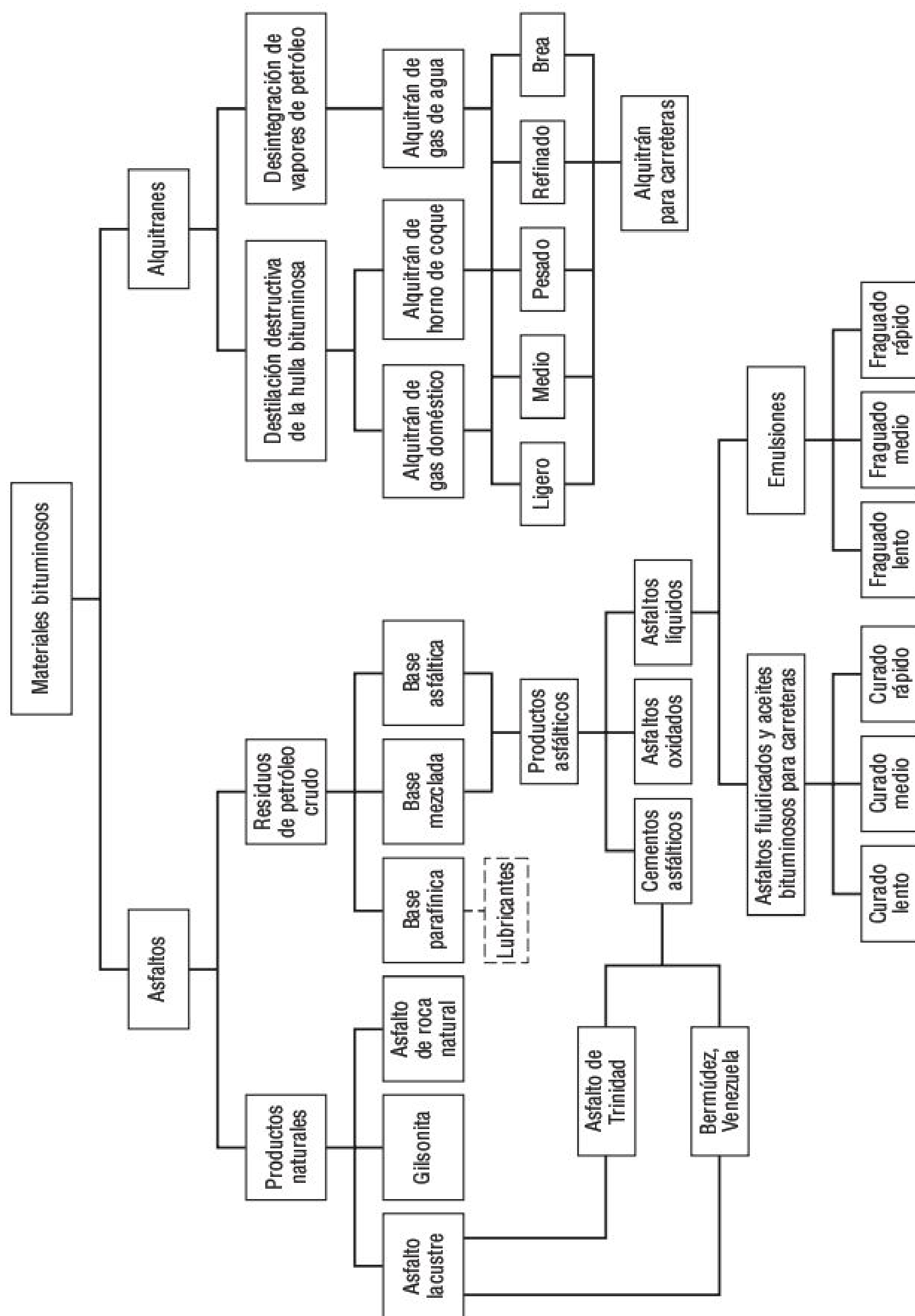


FIGURA 9.1 Clasificación de los materiales bituminosos. (Goetz y Wood, 1960).

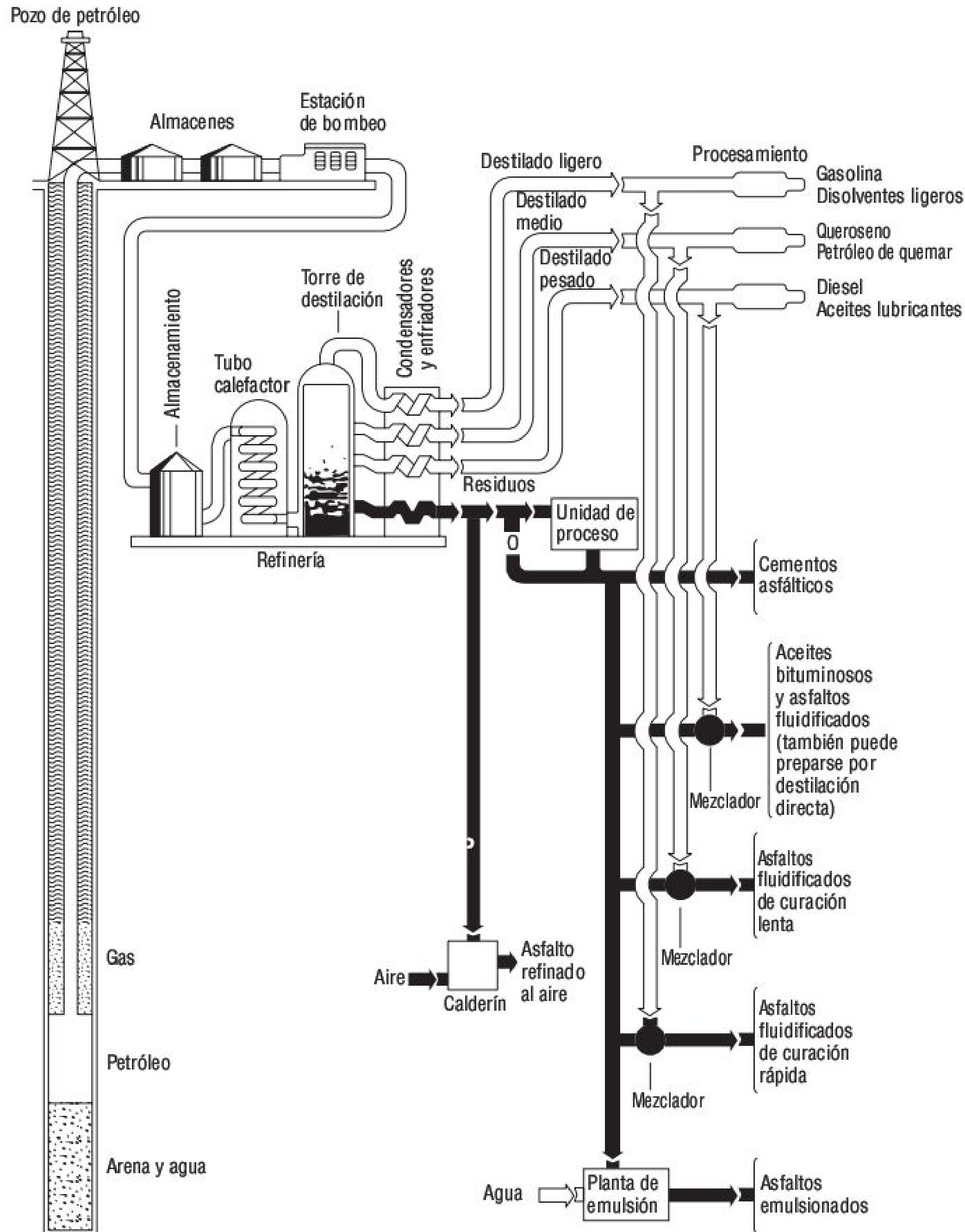


FIGURA 9.2 Destilación del petróleo crudo. (Instituto del asfalto, 1989).

En este capítulo se repasan los tipos, usos y propiedades físicas y químicas del asfalto. También se presenta el hormigón asfáltico utilizado en carreteras y pavi-

mentos de aeropuertos, que es una mezcla de asfalto y áridos. En el capítulo se analizan las recientemente desarrolladas especificaciones PG para los aglomerantes asfálticos, así como el diseño de mezclas Superpave. También se incluyen los temas acerca del reciclado de materiales de pavimentos y de los aditivos utilizados para modificar las propiedades del asfalto.

9.1 Tipos de productos asfálticos

El asfalto utilizado en los pavimentos se produce en tres formas diferentes: *cemento asfáltico, asfalto fluidificado* y *emulsión asfáltica*. El cemento asfáltico es una mezcla de hidrocarburos de diferentes pesos moleculares. Las características del asfalto dependen de la composición química y de la distribución de los diferentes hidrocarburos. A medida que esa distribución incluye pesos moleculares más grandes, el asfalto se vuelve más duro y viscoso. A temperatura ambiente, el cemento asfáltico es un material semisólido que no se puede aplicar fácilmente como aglomerante sin antes calentarlo. También se han desarrollado productos de asfalto líquido, asfaltos fluidificados y emulsiones, que pueden utilizarse sin necesidad de calentarlos (Instituto del asfalto, 1989).

Aunque los asfaltos líquidos son cómodos, no permiten obtener una calidad de hormigón asfáltico comparable a la que se produce calentando cemento asfáltico normal y mezclándolo con áridos cuidadosamente seleccionados. El cemento asfáltico tiene unas excelentes características adhesivas, lo que hace que sea un aglomerante muy adecuado para la construcción de pavimentos. De hecho, es el material aglomerante más comúnmente utilizado en este tipo de construcciones.

El asfalto fluidificado se fabrica disolviendo cemento asfáltico en un disolvente a base de hidrocarburo con un menor peso molecular. Cuando se rocía el asfalto fluidificado sobre un pavimento o se mezcla con áridos, el disolvente se evapora, dejando como aglomerante el residuo asfáltico. En el pasado, los asfaltos fluidificados se utilizaban ampliamente en la construcción de autopistas. Eran muy efectivos y podían aplicarse fácilmente. Sin embargo, presentaban tres desventajas que han limitado enormemente el uso de estos asfaltos. En primer lugar, a medida que se han ido incrementando los costes del petróleo, el uso de estos caros disolventes como agentes de transporte del cemento asfáltico ha dejado de ser efectivo en términos de costes. En segundo lugar, los asfaltos fluidificados son materiales peligrosos debido a la volatilidad de los disolventes. Por último, la aplicación del asfalto fluidificado libera a la atmósfera hidrocarburos que son inaceptables para la conservación del medio ambiente. De hecho, muchas regiones en las que existen problemas de contaminación del aire han prohibido por ley el uso de los asfaltos fluidificados.

Una alternativa a disolver el asfalto en un producto químico consiste en dispersar el asfalto en agua en forma de emulsión. En este proceso, el cemento asfáltico se descompone físicamente en una serie de glóbulos de tamaño microscópico que se mezclan con un agua que contiene un agente emulsionante. Los asfaltos emulsionados suelen

estar compuestos por entre aproximadamente un 60% y un 70% de residuo asfáltico, un 30% a un 40% de agua y una fracción de porcentaje de agente emulsionante. Existen muchos tipos de agentes emulsionantes; básicamente, todos ellos son algún tipo de material jabonoso. La molécula emulsionante tiene dos componentes distintos: la parte de la cabeza, que tiene una carga electrostática, y la parte de la cola, que tiene una alta afinidad por el asfalto. La carga puede ser positiva, lo que produce una emulsión *catiónica,* o negativa, que da lugar a una emulsión *aniónica*. Cuando se introduce el asfalto en el agua con el agente emulsionante, la parte de la cola del emulsionante se une al asfalto dejando la cabeza expuesta. La carga eléctrica del emulsionante provoca una fuerza de repulsión entre los glóbulos del asfalto, lo que mantiene su separación dentro del agua. Puesto que la gravedad específica del asfalto es muy próxima a la del agua, los glóbulos tienen una flotabilidad neutra y, por tanto, no tienden ni a elevarse ni a hundirse. Cuando se mezcla la emulsión con áridos o se utiliza en un pavimento, el agua se evapora, permitiendo que los glóbulos de asfalto se aproximen formando así el aglomerante. El fenómeno de separación entre el residuo asfáltico y el agua se denomina *desmulsificación* o *fraguado*. La velocidad de fraguado de la emulsión puede controlarse variando el tipo y la cantidad del agente emulsionante.

Puesto que la mayoría de los áridos presentan cargas superficiales positivas (como por ejemplo la cal) o negativas (como los áridos silíceos) tienden a ser compatibles con las emulsiones aniónicas o catiónicas, respectivamente. De todos modos, algunos fabricantes de emulsiones pueden obtener emulsiones que se unen bien con tipos de áridos específicos, independientemente de su carga superficial.

Aunque las emulsiones y los asfaltos fluidificados pueden utilizarse en las mismas aplicaciones, el empleo de las emulsiones se está incrementando, porque no requiere el uso de disolventes costosos y peligrosos.

9.2 Usos del asfalto

El principal uso del asfalto se encuentra en la construcción y mantenimiento de pavimentos. Además, también se utiliza en el sellado e impermeabilización de diversos componentes estructurales, como por ejemplo tejados y cimientos subterráneos.

La selección del tipo y calidad del asfalto depende del tipo construcción y del clima que exista en la región. Los cementos asfálticos, también denominados aglomerantes asfálticos, se utilizan normalmente para fabricar hormigón asfáltico de mezcla en caliente para la capa superficial de los pavimentos de asfalto (véanse las Figuras 9.3 y 9.4). El hormigón asfáltico también se emplea en el parcheo y reparación de todo tipo de pavimentos, tanto de asfalto como de hormigón de cemento portland. Los asfaltos líquidos (emulsiones y fluidificados) se emplean en aplicaciones de mantenimiento de pavimentos, como por ejemplo para la aplicación de riegos pulverizados, tratamientos superficiales, lechadas asfálticas y micropavimentos (véanse las Figuras 9.5 y 9.6) (Instituto del asfalto 1989, Mamlouk y Zaniewski, 1998). Los asfaltos



FIGURA 9.3 Aplicación del asfalto de mezcla en caliente (hormigón asfáltico) utilizado en la capa superficial de un pavimento asfáltico.



FIGURA 9.4 Compactación de un asfalto de mezcla en caliente.



FIGURA 9.5 Aplicación de un riego pulverizado para la conservación de un pavimento existente.



FIGURA 9.6 Aplicación de un mciropavimento para la conservación de un pavimento existente.

TABLA 9.1 Aplicaciones del asfalto en pavimentación.

Término	Descripción	Aplicación
Asfalto de mezcla en caliente	Mezcla cuidadosamente diseñada de asfalto y áridos.	Superficie de los pavimentos, parcheo.
Mezcla fría	Mezcla de áridos y asfalto líquido.	Parcheo, superficie de carreteras de bajo volumen de tráfico, base asfáltica estabilizada.
Riego pulverizado	Pulverización de una emulsión de asfalto diluido sobre la superficie de un pavimento existente.	Sellado de la superficie de un pavimento existente.
Capa de imprimación	Capa que se pulveriza para unir la base de árido y la superficie de hormigón asfáltico.	Construcción de pavimento flexible.
Capa ligante	Capa que se pulveriza entre capas sucesivas de hormigón asfáltico.	Construcción de pavimentos nuevos o entre un pavimento existente y una capa superpuesta.
Tratamiento superficial	Capa de emulsión asfáltica (o de cemento asfáltico, o de asfalto fluidificado) que se pulveriza, seguida de una capa de árido.	Mantenimiento de pavimentos existentes o superficies de carreteras con un bajo volumen de tráfico.
Lechada asfáltica	Mezcla de emulsión, árido fino de granulometría correcta y agua.	Reparación de la superficie de carreteras con un bajo volumen de tráfico.
Micropavimento	Mezcla de emulsión modificada con polímeros, árido fino triturado de granulometría correcta, relleno mineral, agua y aditivos.	Texturado, sellado, relleno de grietas, relleno de rodadas y nivelaciones de poca importancia.

líquidos también pueden emplearse para sellar las grietas de los pavimentos. Los asfaltos se mezclan también con áridos para fabricar mezclas frías. Las mezclas frías se usan normalmente para el parcheo (cuando no hay disponible hormigón asfáltico de mezcla en caliente), la estabilización de las bases y subbases de los pavimentos y para recubrimiento de carreteras de bajo volumen de tráfico. La Tabla 9.1 muestra las aplicaciones comunes de los asfaltos de pavimentación.

9.3 Susceptibilidad térmica del asfalto

La consistencia del asfalto se ve enormemente afectada por la temperatura. El asfalto se vuelve quebradizo a bajas temperaturas y se reblandece a temperaturas altas. La Figura

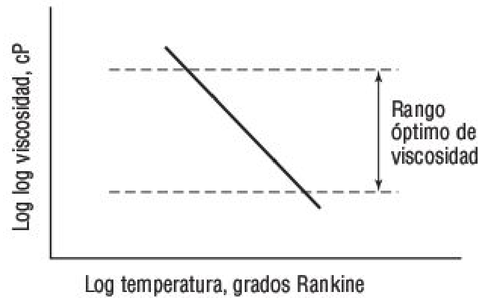


FIGURA 9.7 Relación típica entre la viscosidad del asfalto y la temperatura.

9.7 muestra una relación conceptual entre la temperatura y el logaritmo de la viscosidad. La viscosidad del asfalto se reduce a medida que la temperatura aumenta. La susceptibilidad térmica del asfalto puede representarse mediante la pendiente de la recta mostrada en la Figura 9.7. Cuanto más pronunciada sea esa pendiente, mayor será la susceptibilidad térmica del asfalto. Sin embargo, pueden utilizarse aditivos para reducir esta susceptibilidad.

Cuando se mezcla el asfalto con áridos, la mezcla se comportará correctamente solo en caso en que la viscosidad del asfalto se encuentre comprendida dentro de un rango óptimo. Si la viscosidad del asfalto es superior al rango óptimo, la mezcla será demasiado quebradiza y susceptible a la aparición de grietas a bajas temperaturas (Figura 9.8). Por el contrario, si la viscosidad está por debajo del rango óptimo, la mezcla fluirá con facilidad, lo que provocará una deformación permanente (rodadas), como se ilustra en la Figura 9.9.



FIGURA 9.8 Grietas térmicas provocadas por el uso de un asfalto demasiado rígido en una región de clima frío.



FIGURA 9.9 Rodadas que pueden aparecer como resultado de la utilización de un asfalto demasiado blando.

Debido a la susceptibilidad térmica, es necesario seleccionar el grado del cemento asfáltico de acuerdo con el clima de la región. La viscosidad del asfalto debe encontrarse preferentemente dentro del rango óptimo correspondiente al rango anual de temperaturas de esa área. En climas fríos, se utilizan asfaltos de grado suave, mientras que los de grado duro se emplean en climas cálidos (véase la Figura 9.10).

9.4 Propiedades químicas del asfalto

El asfalto es una mezcla de una amplia variedad de hidrocarburos, principalmente compuesta por átomos de hidrógeno y de carbono, con otros componentes menores como el azufre, el nitrógeno y el oxígeno (heteroátomos), y junto con trazas de metales. Los porcentajes de los componentes químicos, así como la estructura molecular del asfalto, varían dependiendo del origen del petróleo crudo (Peterson, 1984).

La estructura molecular del asfalto afecta a las propiedades físicas y de envejecimiento del asfalto, así como al modo en que las moléculas del asfalto actúan entre sí y con el árido. Las moléculas de asfalto presentan tres disposiciones, dependiendo de los enlaces de los átomos de carbono: (1) *alifática* o parafínica, que forma cadenas rectas o ramificadas; (2) *anillos saturados,* que tienen la relación hidrógeno-carbono más alta y (3) *anillos insaturados* o aromáticos. Los heteroátomos conectados a las moléculas de

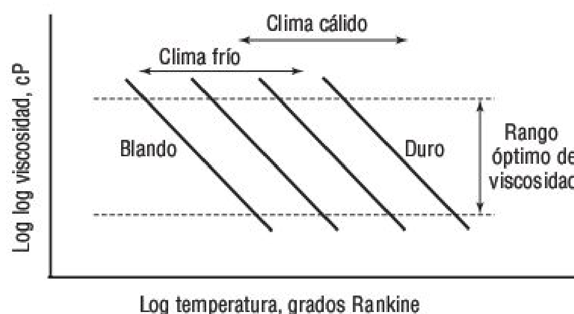


FIGURA 9.10 Selección del grado apropiado de aglomerante asfáltico en función del clima.

carbono alteran la configuración molecular. Puesto que el número de estructuras moleculares en el asfalto es extremadamente grande, la investigación de la química del asfalto se ha centrado en separar el asfalto en una serie de fracciones principales, que sean menos complejas o más homogéneas. Cada uno de estas fracciones tiene, por su parte, una estructura química compleja.

El cemento asfáltico consta de asfaltenos y maltenos (petrolenos). Los maltenos a su vez, están compuestos por resinas y aceites. Los asfaltenos son sólidos desmenuzables de color marrón oscuro y químicamente complejos, presentando la más alta polaridad entre los componentes. Los asfaltenos son los responsables de la viscosidad y las propiedades adhesivas del asfalto. Si el contenido de asfaltenos es inferior al 10%, el hormigón asfáltico será difícil de compactar para alcanzar la densidad apropiada para la construcción. Las resinas son oscuras y de tipo sólido o semisólido, con una viscosidad que se ve extremadamente afectada por la temperatura. Las resinas actúan como agentes que dispersan los asfaltenos en los aceites; estos aceites son, por su parte, líquidos de color claro o blanco. Cuando las resinas se oxidan, producen moléculas de tipo asfalteno. Varios componentes del asfalto interactúan entre sí para formar un sistema equilibrado o compatible. Este equilibrio de los componentes es el que hace que el asfalto resulte adecuado como aglomerante.

Se utilizan tres esquemas de fraccionamiento distintos para separar los componentes del asfalto, como se ilustra en la Figura 9.11. El primer esquema [Figura 9.11(a)] es el de fraccionamiento con disolventes parciales, en el que se añade *n*-butanol para separar (precipitar) los componentes asfálticos. A continuación, el butanol se evapora y el componente restante se disuelve en acetona y se enfría a $-23°C$, para precipitar los componentes parafínicos y dejar los cíclicos en solución. El segundo esquema [Figura 9.11(b)] es el de adsorción–desorción selectiva, en el que se añade *n*-heptano para separar el asfalteno. La fracción de maltenos restante se introduce en una columna cromatográfica y se desorbe utilizando disolventes con polaridad creciente para separar otras fracciones. El tercer esquema [Figura 9.11(c)] es una precipitación química en la que se añade *n*-pentano para separar los asfaltenos. Se añade una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en concentración creciente para precipitar otras fracciones.

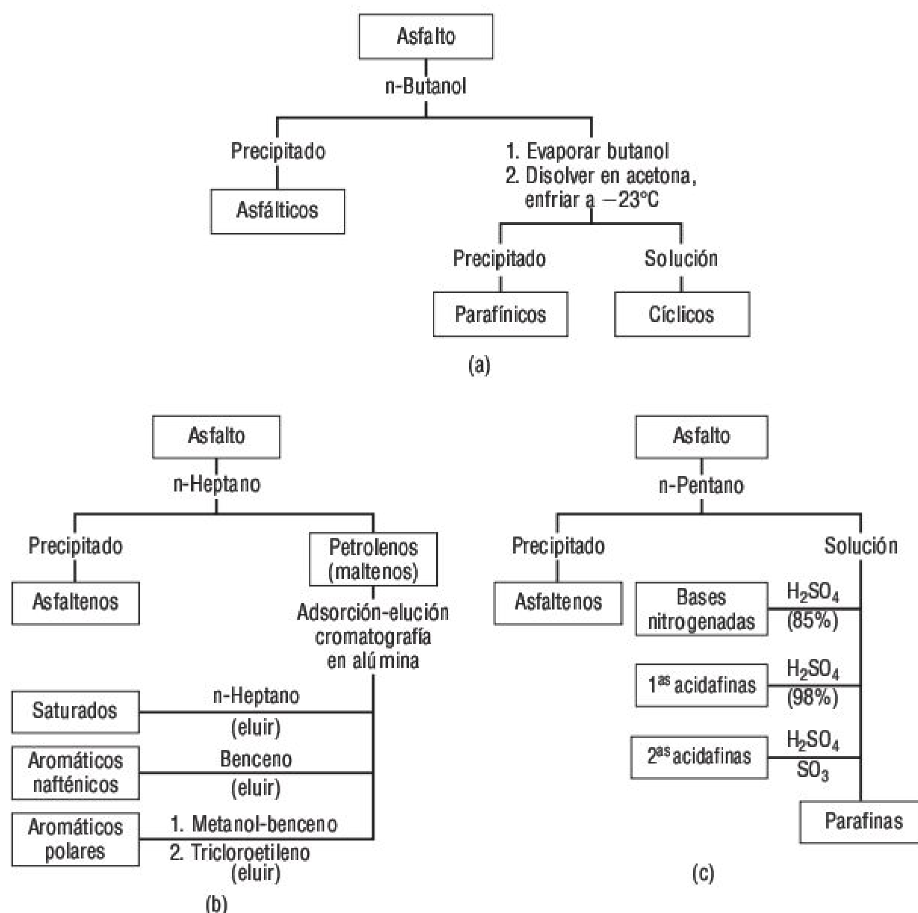


FIGURA 9.11 Diagramas de los tres esquemas de fraccionamiento del asfalto: (a) fraccionamiento con disolventes parciales, (b) adsorción-desorción selectiva y (c) precipitación química (Peterson, 1984).

Además, el asfalto puede separarse basándose en el tamaño molecular de los componentes, utilizando para ello un sistema de cromatografía líquida de alta presión (cromatografía de permeación de gel).

9.5 Superpave y aglomerantes PG

En 1987, el Programa de investigación estratégico sobre autopistas (SHRP, *Strategic Highway Research Program*) de Estados Unidos comenzó a desarrollar un nuevo sistema para la especificación de materiales asfálticos y para el diseño de mezclas asfálticas. El programa de investigación SHRP generó el método de diseño de mezclas Superpave (*Su*perior *Per*forming Asphalt *Pave*ments) para el hormigón asfáltico y el método PG (*Performance Grading*) para la especificación de aglomerantes asfálticos (McGennis, 1994; 1995). Los objetivos de las investigaciones sobre el asfalto del SHRP eran ampliar

la vida útil o reducir los costes del ciclo de vida de los pavimentos de asfalto; reducir los costes de mantenimiento y minimizar la tasa de fallos prematuros. Un resultado importante de este esfuerzo de investigación fue el desarrollo de una serie de especificaciones basadas en el comportamiento de los aglomerantes asfálticos y las mezclas asfálticas, con el fin de controlar tres modos de fallo distintos: las rodadas, las grietas de fatiga y el agrietamiento térmico. Observe que las especificaciones PG emplean el término *aglomerante asfáltico* para referirse a cualquier tipo de cemento asfáltico con o sin la adición de modificadores.

9.6 Caracterización del asfalto

Hay disponibles muchas pruebas que permiten caracterizar el cemento asfáltico. Algunas de ellas son utilizadas habitualmente por los organismos relacionados con la construcción de autopistas y carreteras, mientras que otras se emplean en la investigación. Puesto que las propiedades del asfalto son extremadamente sensibles a la temperatura, todas las pruebas del asfalto deben realizarse a una temperatura especificada dentro de unas tolerancias muy estrictas (Instituto del asfalto, 1989).

Antes de las investigaciones del SHRP, las especificaciones del cemento asfáltico se basaban en medidas de la viscosidad, la penetración, la ductilidad y la temperatura del punto de ablandamiento. Estas medidas no son suficientes para describir de forma adecuada las propiedades viscoelásticas y de fallo del cemento asfáltico que son necesarias para relacionar las propiedades del aglomerante asfáltico con las propiedades de las mezclas y con el comportamiento de los pavimentos. Las nuevas especificaciones de los aglomerantes PG se diseñaron para proporcionar propiedades relativas al comportamiento que puedan ponerse en relación de forma racional con el comportamiento de los pavimentos (McGennis, 1994).

9.6.1 Enfoque de caracterización PG

Las pruebas PG usadas para caracterizar los aglomerantes asfálticos se realizan para temperaturas de pavimento que representan los puntos superior, intermedio e inferior del rango de temperaturas de servicio. Las medidas se obtienen para una serie de temperaturas fijadas, al mismo tiempo que se mantienen los mecanismos de perturbación. De este modo, a diferencia de las especificaciones anteriores que requerían realizar la prueba a una temperatura fija y variaban los requisitos para los distintos grados de asfalto, las especificaciones PG requieren que se efectúe la prueba a la temperatura crítica del pavimento y que se fijen los criterios para todos los grados de asfalto. De este modo, la filosofía subyacente a las especificaciones PG garantiza que las propiedades del asfalto cumplan los criterios de especificación a la temperatura crítica del pavimento.

Para las especificaciones de aglomerante se requieren tres temperaturas de diseño del pavimento: una temperatura máxima, otra intermedia y otra mínima. Las tempera-

turas de pavimento máxima y mínima para una ubicación concreta en Estados Unidos pueden generarse utilizando los algoritmos contenidos dentro del software SHRP, que están basados en información de temperaturas obtenidas de 7.500 estaciones meteorológicas. La temperatura máxima de diseño para el pavimento se selecciona como el valor medio más alto de la temperatura máxima media del pavimento de siete días sucesivos. La temperatura de diseño mínima para el pavimento será la temperatura mínima de pavimento que cabe esperar a lo largo de toda la vida útil del mismo. La temperatura intermedia de diseño del pavimento es la media de las temperaturas máxima y mínima de diseño del pavimento más 4°C.

Las pruebas de laboratorio que evalúan la potencial aparición de rodadas utilizan la temperatura máxima de diseño del pavimento, mientras que los ensayos que evalúan el potencial de fatiga emplean la temperatura intermedia. Las pruebas de agrietamiento térmico usan la temperatura mínima de diseño del pavimento más 10°C (18°F). La temperatura mínima de diseño del pavimento se incrementa en 10°C para reducir el tiempo de prueba. Estos resultados se corrigen para obtener los correspondientes valores para la temperatura mínima, utilizando el factor de corrección tiempo–temperatura (McGennis, 1994).

9.6.2 Caracterización PG de los aglomerantes

En el método PG se utilizan diversos ensayos para caracterizar el aglomerante asfáltico. Algunos de estos ensayos se han estado utilizando anteriormente para las pruebas de asfalto, mientras que otros son nuevos. En este libro, vamos a resumir los pasos principales y la importancia de los ensayos SHRP. Con la excepción de los ensayos de viscosímetro rotacional (Brookfield), de solubilidad y del punto de inflamabilidad, las temperaturas de prueba se seleccionan basándose en la temperatura local de diseño. La especificación del aglomerante indica las temperaturas específicas de prueba utilizadas para los distintos aglomerantes en cada ensayo (McGennis, 1994). Cuatro de los ensayos se realizan con el asfalto original: el de punto de inflamabilidad, el de solubilidad, el de la viscosidad rotacional y el del reómetro de cortante dinámica. Para simular el efecto de envejecimientos sobre las propiedades del aglomerante, se utiliza el horno de película delgada rodante y el equipo de envejecimiento a presión para acondicionar el aglomerante, con el fin de que exhiba los efectos típicos a corto y a largo plazo. Las muestras se acondicionan con el horno de película delgada rodante y con el equipo de envejecimiento a presión antes de determinar sus características con respecto a la fatiga y al agrietamiento a bajas temperaturas.

Horno de película delgada rodante El procedimiento del horno de película delgada rodante (RTFO, *Rolling Thin-Film Oven*) se utiliza para simular el envejecimiento a corto plazo que tiene lugar en el asfalto durante la producción del hormigón asfáltico. En el método RTFO (ASTM D2872), el aglomerante asfáltico se vierte en una serie de botellas especiales, como se muestra en la Figura 9.12. Las botellas se colocan en un bastidor dentro de un horno de tiro forzado, a una temperatura de 163°C (325°F) durante 75 mi-

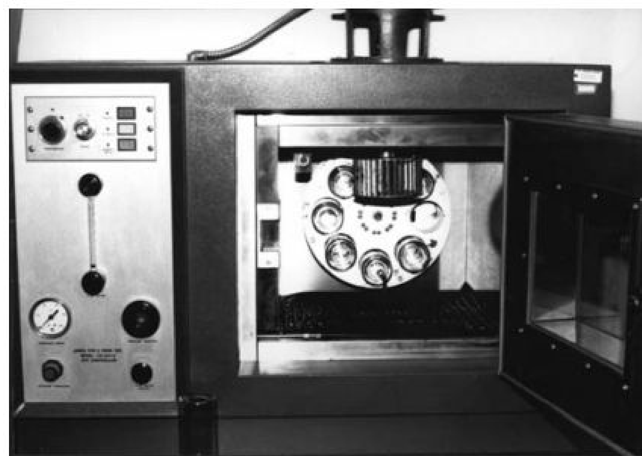


FIGURA 9.12 Aparato de ensayo de horno de película delgada rodante.

nutos. El bastidor gira verticalmente exponiendo de manera continua el asfalto fresco a la corriente de aire. El aglomerante contenido en las botellas que giran también recibe un chorro de aire para acelerar el proceso de envejecimiento. Las especificaciones PG limitan la cantidad de masa perdida durante el acondicionamiento RTFO. El acondicionamiento mediante horno de película delgada rodante se utiliza para preparar las muestras de cara a la evaluación del potencial de aparición de rodadas mediante el reómetro de cortante dinámica y antes de acondicionar las muestras con el equipo de envejecimiento a presión. Utilizando los correspondientes métodos de ensayo, se mide la penetración y la viscosidad del aglomerante envejecido y los resultados se comparan con los del asfalto nuevo.

Envejecimiento a presión El equipo de envejecimiento a presión (PAV, *Pressure-Aging Vessel*) consta de una cámara de temperatura controlada y de una serie de dispositivos de control de la presión y la temperatura, como se muestra en la Figura 9.13 (ASTM D6521). Primero se envejece el aglomerante asfáltico utilizando el horno de película delgada rodante (RTFO) (ASTM D2872). Un determinado espesor de residuo procedente del RTFO se coloca en las bandejas del PAV. A continuación, el asfalto se envejece a la temperatura especificada de envejecimiento durante 20 horas en ese contenedor, sometiéndolo a una presión de aire de 2,10 MPa (305 psi). La temperatura de envejecimiento, que está comprendida entre 90°C y 110°C, se selecciona de acuerdo con el grado del aglomerante asfáltico. Puesto que el procedimiento utilizado fuerza a que entre oxígeno en la muestra, es necesario utilizar un horno de vacío para eliminar de la muestra las burbujas de aire antes de iniciar al ensayo.

El PAV está diseñado para simular el envejecimiento oxidativo que tiene lugar en los aglomerantes asfálticos durante la vida útil del pavimento. El residuo de este proceso puede emplearse para estimar las propiedades físicas o químicas de un aglomerante asfáltico después de 5 o 10 años de servicio.



FIGURA 9.13 Aparato de envejecimiento a presión.

Punto de inflamabilidad A altas temperaturas, el asfalto puede inflamarse en presencia de una llama o una chispa. El ensayo de punto de inflamabilidad es una prueba de seguridad que mide la temperatura a la que el asfalto se inflama; el cemento asfáltico puede calentarse hasta una temperatura inferior a esta sin que haya ningún riesgo de incendio. El método de copa abierta de Cleveland (ASTM D92) requiere llenar parcialmente una copa estándar de bronce con cemento asfáltico. A continuación, el asfalto se calienta a una velocidad especificada y se hace pasar periódicamente una pequeña llama sobre la superficie de la copa, como se muestra en la Figura 9.14. El punto de inflamabilidad es la temperatura del asfalto cuando los vapores procedentes de la muestra son capaces de sostener una llama durante un periodo de tiempo corto. La temperatura mínima a la que hay suficientes vapores como para sostener una llama durante un periodo de tiempo prolongado es el punto de combustión.

Ensayo de viscosímetro rotacional El equipo de viscosímetro rotacional o de Brookfield (ASTM D4402) está formado por un viscosímetro con un cilindro coaxial rotatorio y una unidad de control de la temperatura, como se muestra en la Figura 9.15. El ensayo se lleva a cabo con aglomerantes no envejecidos. La muestra de aglomerante asfáltico se coloca en la cámara de muestras a 135°C (275°F); a continuación, ambas se introducen en la termocélula. Se introduce una aguja en la muestra de asfalto y se la hace girar a una velocidad especificada. La viscosidad se determina mediante el par necesario para que la aguja gire a la velocidad especificada. El tamaño de aguja utilizado se deter-

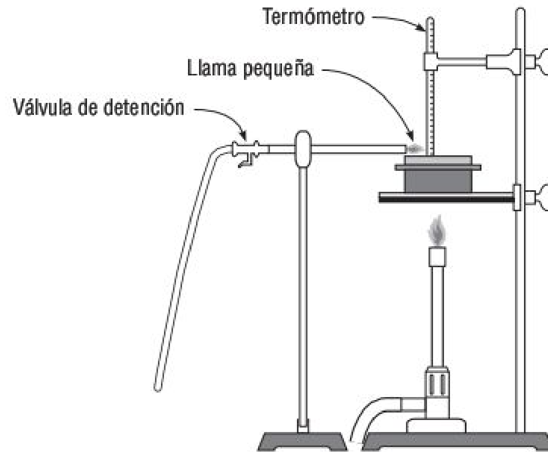


FIGURA 9.14 Aparato de copa abierta de Cleveland para la determinación del punto de inflamabilidad.



FIGURA 9.15 Viscosímetro rotacional.

mina basándose en la viscosidad que se vaya a medir. La máquina de ensayo calcula la viscosidad en centipoises (cP). El límite de la especificación PG está enunciado en Pascal segundos (Pa · s) que es igual a un cP dividido entre 1000. La viscosidad se determina como la media de tres lecturas a intervalos de un minuto, redondeándose al valor 0,1 Pa · s más próximo. Además de realizar el ensayo a la temperatura dada en la especificación, se realizan ensayos adicionales a temperaturas más altas para establecer las relaciones de susceptibilidad térmica utilizadas para determinar las temperaturas de mezclado y compactación requeridas para el proceso de diseño de mezclas.

Reómetro de cortante dinámica El sistema de ensayo con reómetro de cortante dinámica, Figura 9.16, está compuesto por dos placas de metal paralelas, un cámara ambiental, un dispositivo de carga y un sistema de control y adquisición de datos (AASHTO T315). El reómetro de cortante dinámica se utiliza para medir tres requisitos de especificación

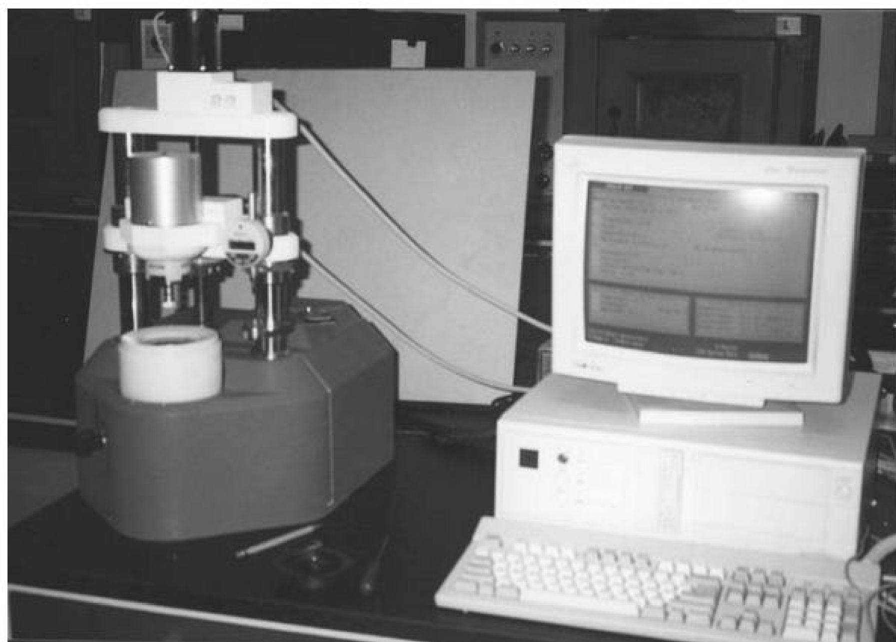


FIGURA 9.16 Reómetro de cortante dinámica.

en el sistema PG. Para probar el aglomerante no envejecido y en las pruebas de potencial aparición de rodada, la temperatura de prueba es igual a la temperatura superior correspondiente al grado del aglomerante asfáltico (por ejemplo, un PG 64–22 se probará a 64°C). Para estas pruebas, el tamaño de la muestra es de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor. Antes de probar el potencial de aparición de rodadas, la muestra se acondiciona en el horno de película delgada rodante. Para evaluar la susceptibilidad a la fatiga se utiliza la temperatura intermedia; 25°C para el PG 64-22. El tamaño de la muestra es de 8 mm de diámetro por 2 mm de espesor. Antes de realizar la prueba, la muestra se acondiciona en el horno de película delgada rodante y a continuación en el equipo de envejecimiento a presión.

Durante las pruebas, se hace oscilar una de las placas paralelas con respecto a la otra a una serie de frecuencias preseleccionadas y con una serie de amplitudes de deformación rotacional (o amplitudes de par) especificadas. La amplitud requerida dependerá del valor del módulo de la cortante compleja del aglomerante asfáltico sometido a prueba. Las pruebas de cumplimiento de la especificación se realizan a un frecuencia angular de 10 radianes/s. El software del reómetro calcula automáticamente el módulo de cortante compleja (G^*) y el ángulo de fase (δ), que definen la resistencia del aglomerante asfáltico a la deformación cortante dentro de la región viscoelástica lineal.

Reómetro de flexión El reómetro de flexión mide la deflexión en el punto medio de una viga prismática de aglomerante asfáltico con apoyo simple sujeta a una carga constante, que se aplica en su punto medio (ASTM D6648). El sistema de ensayo con reómetro

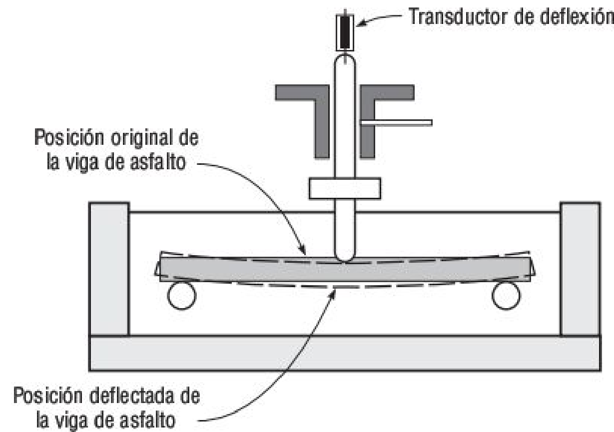


FIGURA 9.17 Esquemático del reómetro de flexión.

de flexión está compuesto por un bastidor de carga, un baño a temperatura controlada y una unidad informatizada de adquisición automática de datos, como se muestra en la Figura 9.17. La temperatura de prueba es 10°C superior a la temperatura nominal más baja del aglomerante (por ejemplo, un PG 64–22 se probará a −12°C). La muestra se acondiciona tanto en el horno de película delgada rodante como en el equipo de envejecimiento a presión antes de realizar el ensayo. Se coloca una viga de aglomerante asfáltico dentro del baño y se la carga con una fuerza constante de 980 ± 50 mN durante 240 segundos. A medida que la viga se deforma, se monitoriza la deflexión del punto medio después de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 segundos. El esfuerzo máximo constante en la viga se calcula a partir de la magnitud de la carga y de las dimensiones de la viga. La deformación máxima se calcula a partir de la deflexión y de las dimensiones de la viga. A continuación, se calcula la rigidez de reptación de la viga dividiendo el esfuerzo máximo entre la deformación máxima, para cada uno de los tiempos de carga especificados.

El comportamiento de agrietamiento térmico a baja temperatura de las mezclas de pavimentación está relacionado con la rigidez de reptación, que se define como la pendiente del logaritmo de la rigidez de reptación en función del logaritmo de la curva temporal del aglomerante asfáltico contenido en la mezcla.

Prueba de tracción directa El sistema de ensayo de tracción directa está compuesto por una máquina de carga de tracción controlada por desplazamiento y con sistema de sujeción, una cámara de temperatura controlada, una serie de dispositivos de medida y un sistema de adquisición de datos, como se muestra en la Figura 9.18 (ASTM D6723). En este ensayo, se toma una probeta de aglomerante asfáltico, acondicionada en el horno de película delgada rodante y en el equipo de envejecimiento a presión, y se estira a una velocidad constante de deformación de 1 mm/min. La temperatura de ensayo es igual al valor nominal mínimo de temperatura más 10°C. Un extensímetro sin contacto mide la elongación de la probeta. Durante el ensayo se monitoriza la carga



FIGURA 9.18 Aparato para pruebas de tracción directa.

máxima desarrollada. Una vez que la carga alcanza un máximo, el esfuerzo y la deformación de tracción se toman como esfuerzo y deformación de fractura, respectivamente.

La deformación de fractura es una medida del grado de elongación que el aglomerante asfáltico puede soportar sin agrietarse. La deformación de fractura se emplea como criterio para la especificación a bajas temperaturas del aglomerante.

9.6.3 Pruebas tradicionales de caracterización del asfalto

Entre las pruebas tradicionales que se han venido utilizando para caracterizar el asfalto antes del desarrollo del sistema PG, podemos citar la de penetración y la de las viscosidades absoluta y cinemática.

Penetración La prueba de penetración (ASTM D5) mide la consistencia del cemento asfáltico. Se prepara una muestra de asfalto y se pone a una temperatura de 25°C (77°F).

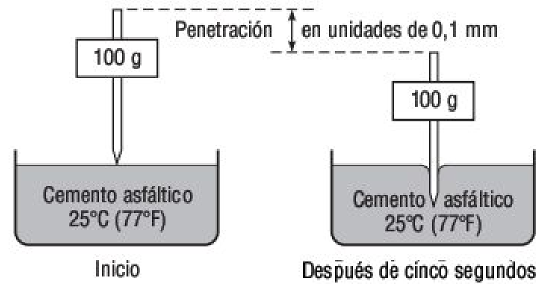


FIGURA 9.19 Prueba de penetración.

Se coloca una aguja estándar con una masa total de 100 gramos sobre la superficie del asfalto. A continuación, se libera la aguja y se la permite penetrar en el asfalto durante cinco segundos, como se muestra en la Figura 9.19. La profundidad de penetración en unidades de 0,1 mm se anota y ese será el valor de penetración. Un valor alto de la penetración corresponde a un asfalto blando.

Pruebas de viscosidad absoluta y cinemática De forma similar a la prueba de penetración, la prueba de viscosidad se utiliza para medir la consistencia del asfalto. Comúnmente se miden dos tipos de viscosidad: la absoluta y la cinemática. El procedimiento de medida de la viscosidad absoluta (ASTM D2171) requiere calentar el cemento asfáltico y verterlo sobre un viscosímetro colocado en un baño de agua o aceite a una temperatura de 60°C (140°F) (Figura 9.20). El viscosímetro es un tubo en U, con un depósito en el que se introduce el asfalto y una sección con un diámetro calibrado y una serie de marcas de temporización. Para las pruebas de viscosidad absoluta se aplica un vacío en uno de los extremos. A continuación, se mide con un cronómetro el tiempo que el asfalto tarda en fluir entre dos marcas de temporización del viscosímetro. Ese tiempo que tarda en fluir, medido en segundos, se multiplica por el factor de calibración del viscosímetro



FIGURA 9.20 Equipo de prueba de la viscosidad absoluta.

para obtener la viscosidad absoluta en poises. Para los diferentes grados de asfalto se emplean viscosímetros de distintos tamaños, con el fin de cumplir con los requisitos de tiempo máximo y mínimo de flujo establecidos en el procedimiento de prueba.

El procedimiento de prueba de la viscosidad cinemática (ASTM D2170) es similar al de la viscosidad absoluta, salvo porque la temperatura de prueba es de 135°C (275°F). Puesto que la viscosidad del asfalto a 135°C es bastante baja, no se utiliza ningún vacío. El tiempo que tarda el asfalto en fluir entre las dos marcas de temporización se multiplica por el factor de calibración para obtener la velocidad cinemática en centistokes (cSt).

9.6.4 Caracterización de emulsiones y asfaltos fluidificados

Los métodos comunes empleados para caracterizar las emulsiones son la destilación y las pruebas de viscosidad de Saybolt–Furol. Los asfaltos fluidificados se caracterizan mediante la destilación.

Destilación de asfaltos fluidificados y emulsiones La prueba de destilación del asfalto fluidificado (ASTM D402) mide la cantidad y el carácter de sus constituyentes volátiles. El procedimiento trata de determinar los porcentajes, en volumen, de las fracciones de destilado a una temperatura específica. La prueba de destilación del asfalto emulsionado (ASTM D244) determina el porcentaje en peso de residuos y destilados de aceite.

Viscosidad Saybolt Furol de una emulsión La viscosidad de una emulsión es un factor importante en la construcción de pavimentos. Cuando se aplica con un rociador, la emulsión debe ser lo suficientemente clara como para poder aplicarla uniformemente a través de la barra de rociado del camión distribuidor y, al mismo tiempo, tiene que ser lo suficientemente viscosa como para que no fluya en los tramos inclinados de una carretera. La viscosidad de una emulsión se mide utilizando el viscosímetro de Saybolt–Furol, mostrado en la Figura 9.21 (ASTM D244). En esta prueba, la emulsión se lleva a una temperatura de 25°C (77°F) o 50°C (122°F) dejándola fluir a través de un orificio específico. La viscosidad de Saybolt–Furol es el tiempo requerido (en segundos) para rellenar un recipiente especial.



FIGURA 9.21 Viscosidad de Saybolt Furol.

9.7 Clasificación de los asfaltos

Se emplean diferentes métodos para caracterizar los aglomerantes asfálticos, los asfaltos fluidificados y las emulsiones asfálticas.

9.7.1 Aglomerantes asfálticos

El aglomerante asfáltico se fabrica en diversos grados o clases. Se emplean cuatro métodos para clasificar los aglomerantes asfálticos:

1. Clasificación por comportamiento.
2. Clasificación por penetración.
3. Clasificación por viscosidad.
4. Clasificación por viscosidad del residuo envejecido.

Especificaciones PG y criterios de selección Hay disponibles diversos grados de aglomerante basándose en su comportamiento sobre el terreno. Los nombres de los grados comienzan por PG (*Performance Graded*) seguido de dos números que representan las temperaturas de diseño máxima y mínima en grados Celsius. Por ejemplo, un aglomerante asfáltico PG 52–28 satisfará la especificación para una temperatura máxima de diseño del pavimento de hasta 52°C (126°F) y una temperatura de diseño mínima del pavimento superior a −28°C (−18°F). Estas temperaturas se calculan 20 mm (0,75 pulgadas) por debajo de la superficie del pavimento. Las temperaturas máxima y mínima del pavimento están relacionadas con la temperatura del aire, así como con otros factores. La Tabla 9.2 muestra los grados de aglomerante en las especificaciones PG. Los aglomerantes PG 76 y 82 están pensados para soportar únicamente cargas lentas transitorias o continuas, como las que se experimentan cerca de las intersecciones o en los carriles especiales para camiones en los puertos de montaña.

Las especificaciones PG de aglomerantes asfálticos se muestran en la Tabla 9.3 (ASTM D6373). La tabla muestra los criterios de diseño para varios parámetros de

TABLA 9.2 Grados de aglomerante en las especificaciones PG.

Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
PG 46	−34, −40, −46
PG 52	−10, −16, −22, −28, −34, −40, −46
PG 58	−16, −22, −28, −34, −40
PG 64	−10, −16, −22, −28, −34, −40
PG 70	−10, −16, −22, −28, −34, −40
PG 76	−10, −16, −22, −28, −34
PG 82	−10, −16, −22, −28, −34

TABLA 9.3 Especificaciones PG para aglomerantes asfálticos.

	PG 46-			PG 52-							PG 58-					PG 64-					
Criterio de comportamiento PG	**34**	**40**	**46**	**10**	**16**	**22**	**28**	**34**	**40**	**46**	**16**	**22**	**28**	**34**	**40**	**10**	**16**	**22**	**28**	**34**	**40**
Temperatura máxima de diseño del pavimento, media de siete días, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	> −34	> −40	> −46	> −10	> −16	> −22	> −28	> −34	> −40	> −46	> −16	> −22	> −28	> −34	> −40	> −10	> −16	> −22	> −28	> −34	> −40
Aglomerante original																					
Temp. del pto. de inflamabilidad: mín. °C	230																				
Viscosidad, ASTM D4402: máximo, 3Pa.s, Temp. de prueba, °C	135																				
Cortante dinámica: G*/ sen δ, mínimo, 1,00kPa Temp. de prueba, 10 rad/s, °C	46			52							58					64					
Residuo del horno de película delgada rodante																					
Pérdida de masa, máximo, %	1.00																				
Cortante dinámica: G*/sen δ, mínimo, 2,20 kPa Temp, prueba, 10 rad/s, °C	46			52							58					64					
Residuo del equipo de envejecimiento a presión (PAV)																					
Temp. de envejecimiento PAV, °C	90			90							100					100					
Cortante dinámica: G* · sen δ, máximo , 5000 kPa Temp. prueba, 10rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Rigidez de reptación, máximo, 300 MPa, valor m, mínimo, 0,300 Temp. prueba 60s, °C	−24	−30	−36	0	−6	−12	−18	−24	−30	−36	−6	−12	−18	−24	−30	0	−6	−12	−18	−24	−30
Tracción directa: deformación de fractura, mínimo, 1,0% Temp. de prueba, 1,0 mm/min, °C	−24	−30	−36	0	−6	−12	−18	−24	−30	−36	−6	−12	−18	−24	−30	0	−6	−12	−18	−24	−30

TABLA 9.3 (Continuación)

Criterio de comportamiento PG	PG 70-						PG 76-					PG 82-				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Temperatura máxima de diseño del pavimento, media de siete días, °C		< 70				<76				<82						
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	> – 10	> – 16	> – 22	> – 28	> – 34	> – 40	> – 10	> – 16	> – 22	> – 28	> – 34	> – 10	> – 16	> – 22	> – 28	> – 34
Aglomerante original																
Temp. del pto. de inflamabilidad: mín.°C									230							
Viscosidad, ASTM D4402: máximo, 3Pa.s, Temp. de prueba, °C									135							
Cortante dinámica: G*/ sen δ mínimo, 1,00 kPa Temp. de prueba, 10 rad/s, °C				70					76					82		
Residuo del horno de película delgada rodante																
Pérdida de masa, máximo								1,00								
Cortante dinámica: G*/ sen δ mínimo, 2,20 kPa Temp. de prueba, 10 rad/s, °C				70					76					82		
Residuo del equipo de envejecimiento a presión (PAV)																
Temp. de envejecimiento PAV, °C	100 (110)				100 (110)					100 (110)						
Dynamic Shear, G* · sen δ Maximum, 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Rigidez de reptación: S, máximo, 300 MPa, valor, mínimo, 0.300 Temp. de prueba, 60s, °C	0	−6	−12	−18	−24	−30	0	−6	−12	−18	−24	0	−6	−12	−18	−24
Tracción directa: deformación de , fractura, mínimo, 1,0% Temp. de prueba, 1,0 mm/min, °C	0	−6	−12	−18	−24	−30	0	−6	−12	−18	−24	0	−6	−12	−18	−24

prueba, a las temperaturas de ensayo especificadas. Una diferencia importante entre las especificaciones PG y las especificaciones tradicionales está en la forma en que funciona la especificación. Como se muestra en la Tabla 9.3, las propiedades físicas (criterios) son constantes para todos los grados, pero las temperaturas a las que estas propiedades deben conseguirse varían dependiendo del clima en el que se espere utilizar el aglomerante. Los rangos de temperatura mostrados en la Tabla 9.3 abarcan todos los regímenes de temperaturas para pavimentos existentes en los Estados Unidos y Canadá.

El aglomerante se selecciona para satisfacer los requisitos de temperatura de diseño máxima y mínima del pavimento. Se utiliza el valor medio de la temperatura máxima del pavimento a lo largo de siete días para determinar el máximo de diseño, mientras que la temperatura de diseño mínima del pavimento es la temperatura del pavimento más baja. Puesto que estas temperaturas máxima y mínima varían de un año a otro, se emplea un nivel de fiabilidad. Tal como se emplea en las especificaciones PG, la fiabilidad es el porcentaje de probabilidad de que en un año la temperatura real del pavimento no exceda de la temperatura máxima de diseño, ni sea inferior a la temperatura mínima de diseño.

Se asume que las temperaturas máxima y mínima de diseño del pavimento a lo largo de los años siguen una distribución normal, como se ilustra en la Figura 9.22(a). En este ejemplo, el promedio de la temperatura máxima de diseño a lo largo de siete días es de 56°C y la desviación estándar es igual a 2°C. De forma similar, el promedio de la temperatura mínima del pavimento a lo largo de un día es de −23°C y la desviación estándar es de 4°C. Puesto que el área bajo la curva de distribución normal representa la probabilidad, como se ilustra en la Figura 1.19, podemos calcular el rango de temperaturas que permitirá satisfacer la probabilidad indicada. Por ejemplo, el rango comprendido entre −23°C y 56°C nos da un 50% de fiabilidad para las temperaturas máxima y mínima. Si restamos dos desviaciones estándar de la temperatura mínima del pavimento y sumamos dos desviaciones estándar a la temperatura máxima, el rango entre −31°C y 60°C nos dará un 98% de fiabilidad. A la hora de seleccionar el grado apropiado, el diseñador debe elegir el grado PG estándar que satisfaga de forma más precisa el nivel de fiabilidad requerido. Este "redondeo" suele implicar que se obtenga un nivel de fiabilidad más alto que el deseado, como se muestra en la Figura 9.22(b). Observe que los niveles de fiabilidad no tienen que ser los mismos para los grados de alta y baja temperatura, dependiendo de las condiciones específicas del pavimento.

Problema de ejemplo 9.1

¿Qué grado PG estándar de aglomerante asfáltico habría que seleccionar teniendo en cuenta las siguientes condiciones?

El promedio a lo largo de siete días de la temperatura máxima del pavimento tiene una media de 57°C y una desviación estándar de 2°C.

La temperatura mínima del pavimento tiene una media de −6°C y una desviación estándar de 3°C.

La fiabilidad es del 98%.

Solución

Temperatura máxima $\geq 57 + (2 \times 2) \geq 61°C$

Temperatura mínima $\geq -6 - (2 \times 3) \geq -12°C$

El grado PG estándar de aglomerante asfáltico más próximo que satisface los dos requisitos de temperatura es PG 64–16.

Otros métodos de clasificación del aglomerante asfáltico La Tabla 9.4 muestra diversos grados de cemento asfáltico basados en la penetración y en sus propiedades (ASTM D946). Los grados se corresponden con el rango de penetración admitido; es decir, la penetración de un asfalto 40–50 debe estar en el rango comprendido entre 40 y 50. En la Tabla 9.5 se muestran distintos grados basados en la viscosidad y en sus propiedades (ASTM D3381). Los números de grado AC se corresponden con 1/100 del punto medio del

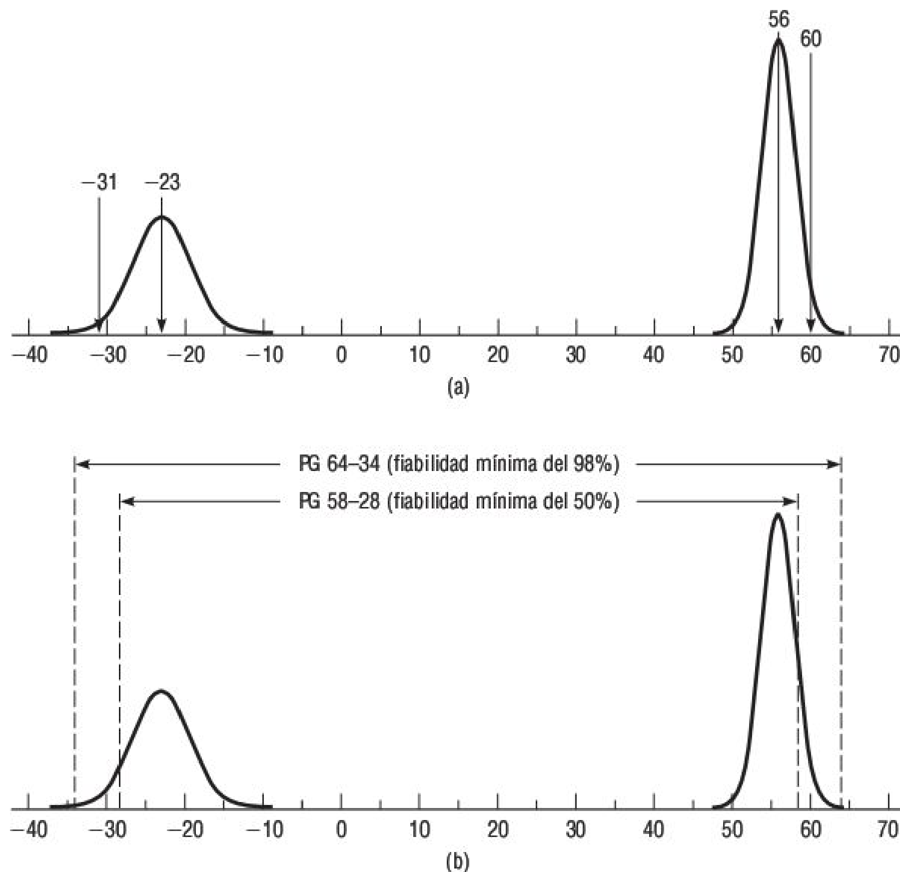


FIGURA 9.22 Ejemplo de distribución de las temperaturas de diseño de pavimentos y de la selección del grado del aglomerante: (a) distribución de las temperaturas máxima y mínima del pavimento y (b) selección del grado del aglomerante.

rango de viscosidad admitido; es decir, un asfalto de grado AC-5 tiene una viscosidad absoluta de 500 ± 100 poises. Por tanto, los cementos asfálticos de alta viscosidad tendrán una designación con un número más alto. Los grados de residuo envejecido están basados en la viscosidad absoluta del asfalto después de haber sido acondicionado para simular los efectos del envejecimiento que tienen lugar cuando el cemento asfáltico se calienta para fabricar hormigón asfáltico. Los números de grado de residuo envejecido se encuentran en el punto medio del rango de viscosidad admitido después del acondicionamiento, como se muestra en la Tabla 9.6 (ASTM D3381). Por ejemplo, un asfalto de grado AR-1000 tiene una viscosidad absoluta de 1.000 ± 250 poises.

TABLA 9.4 Sistema de gradación por penetración del cemento asfáltico

Grado	Penetración mín.	Penetración máx.	Punto de inflamabilidad °C (°F)	Ductilidad (cm)
40–50	40	50	232 (450)	100
60–70	60	70	232 (450)	100
85–100	85	100	232 (450)	100
120–150	120	150	219 (425)	100
200–300	200	300	177 (350)	100

TABLA 9.5 Sistema de gradación por viscosidad del cemento asfáltico.

Grado	Viscosidad Absoluta (poises)	Viscosidad Cinemática* (cSt)	Penetración*	Punto de inflamabilidad* °C (°F)
AC-2.5	250 ± 50	125	220	163 (325)
AC-5	500 ± 100	175	140	177 (350)
AC-10	1.000 ± 200	250	80	219 (425)
AC-20	2.000 ± 400	300	60	232 (450)
AC-30	3.000 ± 600	350	50	232 (450)
AC-40	4.000 ± 800	400	40	232 (450)

*La especificación es para los valores mínimos aceptables.

TABLA 9.6 Sistema de gradación por residuo envejecido del cemento asfáltico.

Grado	Viscosidad Absoluta (poises)	Viscosidad Cinemática* (cSt)	Penetración*	Punto de inflamabilidad** °C (°F)
AR-1000	1.000 ± 250	140	65	205 (400)
AR-2000	2.000 ± 500	200	40	219 (425)
AR-4000	4.000 ± 1.000	275	25	227 (440)
AR-8000	8.000 ± 2.000	400	20	232 (450)
AR-16000	16.000 ± 4.000	550	20	238 (460)

*La especificación es para los valores mínimos aceptables.

**La especificación del punto de inflamabilidad es para el cemento asfáltico antes del acondicionamiento mediante horno de película delgada rodante. Todas las restantes especificaciones son para muestras que ya hayan sido acondicionadas.

9.7.2 Asfaltos fluidificados

Se fabrican tres tipos de asfaltos fluidificados dependiendo de la dureza del residuo y del tipo de disolvente utilizado. Los *asfaltos fluidificados de curación rápida* se fabrican disolviendo un residuo duro en un disolvente altamente volátil, como la gasolina. Los *asfaltos fluidificados de curación media* utilizan un residuo de dureza media y disolvente menos volátil, como el queroseno. Los *asfaltos fluidificados de curación lenta* se producen diluyendo un residuo blando en fuel de baja volatilidad, o simplemente deteniendo el proceso de refinado antes de que todo el fuel haya sido eliminado del producto.

La curación del asfalto fluidificado hace referencia a la evaporación del disolvente del residuo asfáltico. Los asfaltos fluidificados de curación rápida (RC) curan en unos 5 o 10 minutos, mientras que los de curación media (MC) curan en unos pocos días. Los asfaltos fluidificados de curación lenta (SC) curan en unos pocos meses. Además de estos tres tipos, se han definido diferentes grados para los asfaltos fluidificados basándose en la viscosidad cinemática a 60°C (140°F). Se fabrican los grados 30, 70, 250, 800 y 3000, indicando los grados mayores una viscosidad más alta. Así, los asfaltos fluidificados se designan mediante letras (RC, MC o SC), que representan el tipo, seguidas de un número, que representa el grado. Por ejemplo, el asfalto MC-800 es un asfalto fluidificado de curación media con un grado de 800. Los diferentes grados de asfalto fluidificado se fabrican variando la cantidad y el tipo de disolvente y de base asfáltica. Las especificaciones de los asfaltos fluidificados están estandarizadas en las normas ASTM D2026, D2027 y D2028.

9.7.3 Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas se fabrican en diversas combinaciones de la carga eléctrica del agente emulsionante, la velocidad de fraguado de la emulsión, la viscosidad de la emulsión y la dureza del cemento asfáltico. Se fabrican emulsiones tanto aniónicas como catiónicas, que tienen cargas negativas y positivas, respetivamente. Dependiendo de la concentración de la emulsión, el tiempo de fraguado puede ir de rápido a lento. Las emulsiones de fraguado rápido fraguan en, aproximadamente, 5 a 10 minutos, las emulsiones de fraguado medio tardan varias horas y las de fraguado lento unos pocos meses. La viscosidad de la emulsión se clasifica como de flujo normal o como de flujo lento, basándose en la prueba de viscosidad de Saybolt–Furol (Figura 9.21). La consistencia del asfalto contenido en la emulsión se evalúa mediante la prueba de penetración. Normalmente, se emplean residuos asfálticos con una penetración de 100–200; sin embargo, también se pueden utilizar asfaltos blandos con una penetración superior a 200, o asfaltos duros con una penetración comprendida entre 60–100.

Los tipos de emulsión asfáltica se designan basándose en la velocidad de fraguado, utilizándose las letras RS, MS o SS para referenciar las emulsiones de fraguado rápido, medio y lento, respectivamente. Si se ha utilizado un agente emulsionante catiónico, a la designación de fraguado le antecede una C (por ejemplo, una emulsión de fraguado rápido catiónica se designará como CRS). Si la primera letra del tipo de emulsión no es una C, entonces se trata de una emulsión aniónica. La velocidad de flujo de la emulsión se indica a continuación, empleándose un 1 o un 2 para hacer referencia a una emulsión de flujo normal o lento, respectivamente. Por último, se identifica la consistencia del asfalto. No se fabrican todas las posibles combinaciones de tipo de carga, velocidad de fraguado, viscosidad y dureza del asfalto. La Tabla 9.7 resume los tipos y grados de emulsiones (Jansich y Gaillard, 1998).

También se fabrican otros tipos de emulsiones, como las emulsiones gelificadas y las emulsiones de fraguado ultrarrápido. Las especificaciones de diversas emulsiones asfálticas están estandarizadas en la norma ASTM D977.

9.8 Hormigón asfáltico

El hormigón asfáltico, también conocido como asfalto de mezcla en caliente (HMA, *Hot-Mix Asphalt*), está compuesto por cemento asfáltico y áridos mezclados a alta temperatura, y mezclados y compactados sobre la carretera mientras están todavía calientes. Los pavimentos asfálticos (flexibles) representan aproximadamente un 93% de los dos millones de millas de carreteras pavimentadas en Estados Unidos, mientras que el restante 7% de las carreteras disponen de pavimentos de hormigón de cemento portland (rígido). El comportamiento de los pavimentos asfálticos está en función, en buena medida, del material superficial del hormigón asfáltico.

TABLA 9.7 Grados de las emulsiones asfálticas.

Carga	Grado	Velocidad de fraguado	Viscosidad de la emulsión, Saybolt Furol a 25°C	Penetración del residuo
Aniónica	RS-1	Rápida	20–100	100–200
	RS-2	Rápida	75–400*	100–200
	MS-1	Media	20–100	100–200
	MS-2	Media	≥100	100–200
	MS-2h	Media	≥100	60–100
	SS-1	Lenta	20–100	100–200
	SS-1h	Lenta	20–100	60–100
Catiónica	CRS-1	Rápida	20–100	100–250
	CRS-2	Rápida	100–400	100–250
	CMS-2	Media	50–450	100–250
	CMS-2h	Media	50–450	60–100
	CSS-1	Lenta	20–100	100–250
	CSS-1h	Lenta	20–100	60–100

*Prueba a 50°C

El objetivo del proceso de diseño de mezclas de hormigón asfáltico es obtener las siguientes propiedades (Roberts *et al.*, 1996):

1. Estabilidad o resistencia a la deformación permanente bajo la acción de cargas de tráfico, especialmente a altas temperaturas.
2. Resistencia a la fatiga, para impedir el agrietamiento por fatiga bajo la acción de cargas repetidas.
3. Resistencia al agrietamiento térmico que puede producirse debido a la contracción a bajas temperaturas.
4. Resistencia al endurecimiento o al envejecimiento durante la producción en la planta de mezclado y durante la vida útil de servicio.
5. Resistencia a los daños inducidos por la humedad, que pueden provocar la separación del asfalto y de las partículas de áridos.
6. Resistencia al derrape, proporcionando una textura adecuada a la superficie del pavimento.
7. Facilidad de trabajo para reducir el esfuerzo necesario durante la mezcla, la colocación y la compactación.

Independientemente del conjunto de criterios utilizado para establecer los objetivos del proceso del diseño de la mezcla, el diseño de mezclas de hormigón asfáltico requiere aceptar una serie de compromisos. Por ejemplo, puede obtenerse una estabilidad extremadamente alta a expensas de la durabilidad, y viceversa. Por tanto, a la hora de evaluar y ajustar una mezcla de diseño de mezcla para un uso concreto, la granulometría del árido y el contenido en asfalto deben establecer un equilibrio favorable entre los

requisitos de estabilidad y durabilidad. Además de eso, la mezcla producida tiene que ser práctica y económica.

9.9 Diseño de mezclas de hormigón asfáltico

El propósito del diseño de mezclas de hormigón asfáltico es determinar el contenido de asfalto necesario, utilizando el asfalto y los áridos disponibles. El contenido en asfalto del diseño variará para los distintos tipos de materiales, propiedades de los mismos, niveles de carga y condiciones medioambientales. Para producir un hormigón asfáltico de buena calidad es necesario controlar con precisión el contenido de asfalto de la mezcla. Si no se utiliza el contenido de asfalto apropiado, el pavimento no tendrá la durabilidad y la estabilidad suficientes, lo que dará como resultado un fallo prematuro del mismo. Por ejemplo, si no se emplea suficiente aglomerante asfáltico, no todas las partículas de árido quedarán recubiertas por el asfalto, lo que dará como resultado un material menos estable y menos duradero. Asimismo, si se usa demasiado aglomerante, las partículas de árido pueden tener demasiada "lubricación" mutua y podrán moverse unas respecto a otras al someterlas a una carga, dando como resultado un material menos estable. El contenido en asfalto típico de los diseños de mezclas suele estar comprendido entre un 4% y un 7% del peso total de la mezcla.

Antes de que se desarrollara el método de diseño de mezclas Superpave durante el programa SHRP, existían dos métodos comunes de diseño de hormigón asfáltico: el método Marshall (ASTM D1559) y el método Hveem (ASTM D1560). El método Marshall se utilizaba más comúnmente que el Hveem, debido a su relativa simplicidad y a su capacidad de usarlo para el control a pie de obra. Ambos métodos son de naturaleza empírica, es decir, están basados en observaciones anteriores, y ambos se han utilizado satisfactoriamente durante muchas décadas y han permitido construir secciones de pavimento de larga duración. Sin embargo, a causa de su naturaleza empírica, no se adaptan fácilmente a nuevas condiciones, como por ejemplo a los aglomerantes modificados, los áridos de gran tamaño y las cargas de tráfico mayores.

El sistema de diseño Superpave está basado en el comportamiento y es más racional que los métodos Marshall y Hveem. Muchos organismos encargados de la regulación y diseño de proyectos de carreteras y autopistas están implementando el sistema Superpave.

9.9.1 Preparación de probetas en el laboratorio

Para el diseño de mezclas y la realización de pruebas de control de calidad se preparan probetas de hormigón asfáltico en el laboratorio. De cara a preparar esas probetas, los áridos se dosifican y se calientan, de acuerdo con una granulometría especificada. El cemento asfáltico también se calienta por separado y se añade al árido a una velocidad especificada. Los áridos y el asfalto se mezclan en una mezcladora mecánica hasta que

las partículas de árido estén completamente recubiertas de asfalto. Se utilizan comúnmente tres tipos de máquinas de compactación:

1. Compactador giratorio Superpave.
2. Martillo Marshall.
3. Compactador amasador California.

Independientemente del método de compactación utilizado, el procedimiento para preparar probetas sigue siempre, básicamente, los mismos cuatro pasos:

1. Calentar y mezclar el árido y el cemento asfáltico.
2. Colocar el material en un molde.
3. Aplicar una fuerza de compactación.
4. Dejar que la probeta se enfríe y sacarla del molde.

Las técnicas específicas para colocar el material en el molde varían de un método de compactación a otro, siendo necesario ajustarse a los estándares establecidos para cada ensayo concreto.

La principal diferencia entre los procedimientos de compactación es la forma en que se aplica la fuerza de compactación. En el compactador giratorio, la mezcla contenida en el molde se coloca en la máquina de compactación formando un ángulo con la fuerza aplicada. A medida que se aplica la fuerza, se hace girar el molde, creando una acción cortante sobre la mezcla. Los dispositivos de compactación giratorios han estado disponibles desde hace mucho tiempo, pero su uso era limitado debido a la falta de un procedimiento de diseño de mezclas basado en este tipo de compactación. Sin embargo, ahora el método de diseño de mezclas Superpave (FHWA, 1995) utiliza un compactador giratorio, por lo que actualmente este método de compactación es bastante común. La Figura 9.23 muestra el compactador giratorio Superpave.

En el procedimiento Marshall (Figura 9.24), se deja caer un martillo deslizante que pesa 4,45 kg (10 libras) desde una altura de 0,46 m (18 pulgadas) para dar lugar a una fuerza de compactación por impacto (ASTM D1559). La cabeza del martillo Marshall tiene un diámetro igual al tamaño de la probeta, y el martillo se mantiene alineado en todo momento con esta.

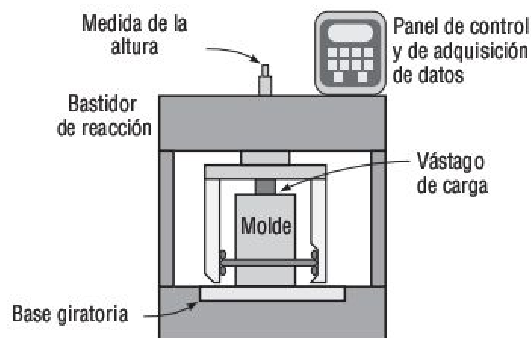


FIGURA 9.23 Compactador giratorio Superpave.



FIGURA 9.24 Compactador de Marshall.

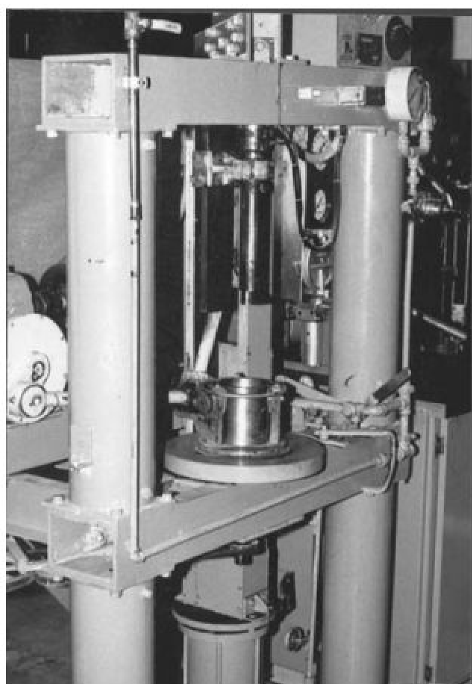


FIGURA 9.25 Compactador amasador California

En el método del compactador amasador California (Figura 9.25), el área del pie compactador es menor que el área del molde. Después de cada golpe de compactación, se

hace rotar el molde, sometiendo así a la mezcla asfáltica a una acción de amasado (ASTM D1561). Una vez completada la acción del compactador amasador, la probeta se vuelve a calentar mientras está todavía en el molde y luego se usa una máquina de compresión para aplicar una fuerza estática con el fin de nivelar la cara de la probeta.

El compactador giratorio Superpave se utiliza para el método de diseño de mezclas Superpave, mientras que el martillo Marshall y el compactador amasador California se emplean para los métodos de diseño de mezclas Marshall y Hveem, respectivamente. El compactador giratorio Superpave permite obtener probetas de 150 mm de diámetro y entre 95 mm y 115 mm de altura, permitiendo el uso de áridos con un tamaño máximo de más de 25 mm (1 pulgada). Las probetas preparadas con el martillo Marshall y el compactador amasador California, así como con algunos compactadores giratorios, suelen tener normalmente 101,6 mm (4 pulgadas) de diámetro y una altura de 63,5 mm (2,5 pulgadas).

9.9.2 Análisis de huecos y de la densidad

Es importante comprender el análisis de huecos y de densidad de las mezclas asfálticas compactadas, tanto a la hora de diseñar las mezclas como en el momento de controlar la construcción. Independientemente del método utilizado, el diseño de mezclas es un proceso que sirve para determinar el volumen de aglomerante asfáltico y de áridos requerido para obtener una mezcla con las propiedades deseadas. Sin embargo, como los volúmenes resultan difíciles y poco prácticos de medir, se usan en su lugar pesos, empléandose la gravedad específica para convertir entre peso y volumen. La Figura 9.26 muestra que la mezcla asfáltica está compuesta de áridos, aglomerante asfáltico y huecos llenos de aire. Observe que una parte del asfalto es absorbida por las partículas de árido. Tres parámetros importantes, comúnmente utilizados, son el porcentaje de huecos de aire (VTM, *Voids in Total Mix*, huecos de la mezcla total), los huecos en el árido mineral (VMA, *Voids in the Mineral Aggregate*) y los huecos rellenos con asfalto (VFA, *Voids Filled with Asphalt)*. Estos porcentajes se definen de la forma siguiente:

$$\text{VTM} = \frac{V_V}{V_m} 100 \tag{9.1}$$

$$\text{VMA} = \frac{V_V + V_{\text{be}}}{V_m} 100 \tag{9.2}$$

$$\text{VFA} = \frac{V_{\text{be}}}{V_{\text{be}} + V_V} 100 \tag{9.3}$$

donde

V_v = volumen de huecos llenos de aire.
V_{be} = volumen efectivo de aglomerante asfáltico
V_m = volumen total de la mezcla

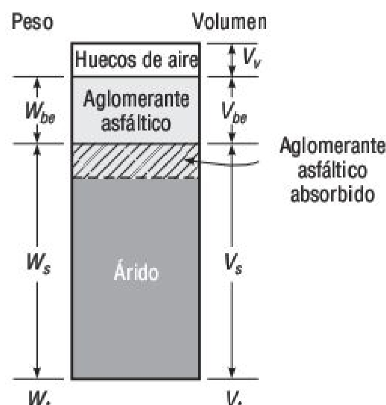


FIGURA 9.26 Componentes de una mezcla asfáltica compactada.

El volumen efectivo de asfalto es igual al asfalto total menos el asfalto absorbido.

Problema de ejemplo 9.2

Una probeta de hormigón asfáltico compactado tiene un 5% de aglomerante asfáltico (gravedad específica igual a 1,023), estando dicho porcentaje definido sobre el peso total de la mezcla; el árido tiene una gravedad específica de 2,755. La densidad en seco de la probeta es de 2,441 Mg/m^3. Ignorando la absorción, calcule VTM, VMA y VFA.

Solución

Utilice la Figura PE 9.2 y suponga que $V_t = 1\ \text{m}^3$.

Determinamos la masa de la mezcla y de los componentes:

Masa total = 1 × 2,441 = 2,441 Mg

Masa del aglomerante asfáltico = 0,05 × 2,441 = 0,122 Mg

Masa del árido = 0,95 × 2,441 = 2,319 Mg

Determinamos el volumen de los componentes:

$$V_b = \frac{0{,}122}{1{,}023} = 0{,}119\ \text{m}^3$$

Puesto que el enunciado del problema especificaba que no hay absorción, $V_{be} = V_b$

$$V_s = \frac{2{,}319}{2{,}755} = 0{,}842\ \text{m}^3$$

$$V_s = \text{Volumen de piedra (árido)}$$

Determinamos el volumen de los huecos:

$$V_V = V_m - V_b - V_s = 1 - 0{,}199 - 0{,}842 = 0{,}039\ \text{m}^3$$

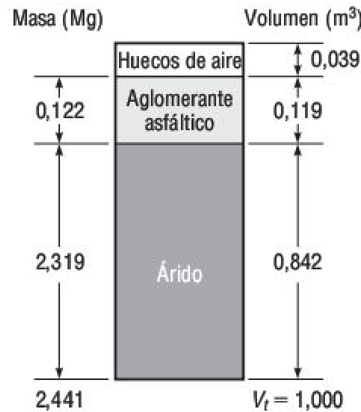


FIGURA PE9.2

Cálculos volumétricos:

$$\text{VTM} = \frac{V_v}{V_m}100 = \frac{0{,}039}{1{,}00}100 = 3{,}9\%$$

$$\text{VMA} = \frac{V_V + V_{\text{be}}}{V_m}100 = \frac{0{,}039 + 0{,}119}{1{,}00}100 = 15{,}8\%$$

$$\text{VFA} = \frac{V_{\text{be}}}{V_{\text{be}} + V_V}100 = \frac{0{,}119}{0{,}119 + 0{,}039}100 = 75\%$$

El análisis de huecos y de la densidad requiere emplear la gravedad específica efectiva del árido recubierto de asfalto, la cual se puede determinar a partir de la gravedad específica máxima teórica de la mezcla (ASTM D2041). Para ello, medimos el peso de la probeta de mezcla en el aire, A, junto con el peso del recipiente de medida lleno de agua, D, y el peso del recipiente de medida que contiene la mezcla asfáltica y está lleno con agua, E. cuando se sumerge la probeta de la mezcla en agua, se utiliza un vacío para eliminar todo el aire de la muestra. La gravedad específica máxima teórica es:

$$G_{\text{mm}} = \frac{A}{A + D - E} \tag{9.4}$$

Solo es necesario determinar la gravedad específica máxima teórica de la muestra para un determinado contenido de asfalto. Sin embargo, el resultado debe estar basado en un promedio de tres muestras (con un mínimo de dos). Por definición, la gravedad específica máxima teórica del hormigón asfáltico es:

$$G_{\text{mm}} = \frac{100}{\left(\dfrac{P_s}{G_{\text{se}}} + \dfrac{P_b}{G_b}\right)} \tag{9.5}$$

Despejando G_{se} en esta ecuación, obtenemos

$$G_{se} = \frac{P_s}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}\right)} \tag{9.6}$$

donde

G_{mm} = gravedad específica máxima teórica del hormigón asfáltico
P_s = porcentaje en peso del árido
P_b = porcentaje en peso del cemento asfáltico
G_{se} = gravedad específica efectiva del árido recubierto de asfalto
G_b = gravedad específica del aglomerante asfáltico

Aunque G_{se} se determina para un solo contenido asfáltico, es constante para cualquier contenido de asfalto. Por tanto, una vez determinada G_{se} a partir de los resultados de la prueba de medida de la gravedad específica máxima teórica, puede utilizarse en la Ecuación 9.5 para calcular G_{mm} para los distintos contenidos de asfalto.

El siguiente paso del proceso consiste en determinar la gravedad específica en seco G_{mb} (ASTM D2726) de cada una de las probetas compactadas. Esto requiere pesar la muestra en tres estados distintos: en estado seco, en estado saturado con superficie seca (SSD) y sumergido. La gravedad específica en seco se calcula como

$$G_{mb} = \frac{\text{Peso en el aire}}{(\text{Peso SSD} - \text{Peso en el agua})} \tag{9.7}$$

El peso específico de cada probeta se calcula multiplicando la gravedad específica en seco por la densidad del agua, 1 Mg/m^3 (62,4 $libras/pie^3$). A continuación se calculan los valores medios de la gravedad específica en seco y del peso específico para el contenido de asfalto, usando esos valores para calcular VTM de la forma siguiente:

$$\text{VTM} = 100\left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \tag{9.8}$$

El porcentaje de huecos en el árido mineral (VMA) es un medida del espacio disponible en los áridos para la adición de cemento asfáltico. El porcentaje VMA es el volumen de la mezcla menos el volumen de los áridos, dividido entre el volumen de la mezcla y expresado como un porcentaje. VMA se suele calcular a partir de la gravedad específica en seco del árido, G_{sb}, de la gravedad específica en seco de la mezcla, G_{mb} y del porcentaje en peso del árido como

$$\text{VMA} = \left(100 - G_{mb}\frac{P_s}{G_{sb}}\right) \tag{9.9}$$

El porcentaje de los huecos llenos de asfalto, %VFA, se determina como

$$\mathrm{VFA} = 100\left(\frac{\mathrm{VMA} - \mathrm{VTM}}{\mathrm{VMA}}\right) \tag{9.10}$$

Problema de ejemplo 9.3

Una probeta de hormigón asfáltico tiene las siguientes propiedades:

Contenido de asfalto = 5,9% del peso total de la mezcla
Gravedad específica en seco de la mezcla = 2,457
Gravedad específica máxima teórica = 2,598
Gravedad específica en seco del árido = 2,692

Calcule los valores de porcentaje VTM, VMA y VFA.

Solución

$$\mathrm{VTM} = 100\left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) = 100\left(1 - \frac{2{,}457}{2{,}598}\right) = 5{,}4\%$$

$$\mathrm{VMA} = \left(100 - G_{mb}\frac{P_s}{G_{sb}}\right) = \left(100 - 2{,}457\frac{100 - 5{,}9}{2{,}692}\right) = 14{,}1\%$$

$$\mathrm{VFA} = 100\left(\frac{\mathrm{VMA} - \mathrm{VTM}}{\mathrm{VMA}}\right) = 100\left(\frac{14{,}1 - 5{,}4}{14{,}1}\right) = 61{,}7\%$$

9.9.3 Diseño de mezclas Superpave

El proceso de diseño de mezclas Superpave comprende los pasos siguientes:

- Selección de los áridos.
- Selección del aglomerante.
- Determinación de la estructura de áridos.
- Determinación del contenido de aglomerantes.
- Evaluación de la susceptibilidad a la humedad.

Selección de los áridos Las propiedades de los áridos en el sistema de diseño de mezclas Superpave pueden ser propiedades comunes o propiedades locales. Se establecen como obligatorias las siguientes propiedades comunes de los áridos:

- Angularidad del árido grueso medida como porcentaje de caras fracturadas.
- Angularidad de los áridos finos (AASHTO TP 33) (véase el aparato de la Figura 5.5).
- Partículas planas y alargadas (ASTM D4791).
- Contenido en arcilla (ASTM D2419).

Los límites de especificación para estas propiedades dependerán del nivel de tráfico y de la profundidad bajo la superficie del pavimento a la que estos materiales puedan ser utilizados, como se muestra en la Tabla 9.8. Además de estas propiedades, los organismos reguladores pueden considerar otros factores que sean críticos para las condiciones locales específicas. Estas propiedades se denominan *locales* y pueden incluir la abrasión (véase el aparato de la Figura 5.6), la consistencia y la presencia de materiales deletéreos. Las propiedades locales se definen en el nivel local, mientras que las propiedades comunes se definen en el nivel nacional.

Los áridos utilizados en el hormigón asfáltico deben tener una granulometría correcta. Superpave recomienda utilizar el diagrama de potencia 0,45 presentado en el Capítulo 5. La curva granulométrica debe pasar a través de una serie de puntos de control especificados por Superpave. La Figura 9.27 muestra los requisitos granulométricos para la mezcla de tamaño nominal 12,5 mm (1/2 pulgada).

Para controlar la segregación, los áridos deben organizarse en montones en función de su tamaño. El diseñador de una mezcla de hormigón asfáltico tiene que seleccionar una mezcla de los montones que cumplen los requisitos de origen, de las propiedades comunes y de granulometría.

TABLA 9.8 Propiedades comunes de los áridos en Superpave.

Nivel de diseño	Angularidad del árido grueso (% min)	Angularidad del árido fino (% min)	Equivalencia en arena (% min)	Planas y alargadas (% min)
Tráfico ligero	55/-	—	40	—
Tráfico medio	75/-	40	40	10
Tráfico pesado	85/80*	45	45	10

*85/80 denota los porcentajes mínimos de una cara fracturada/dos o más caras fracturadas.

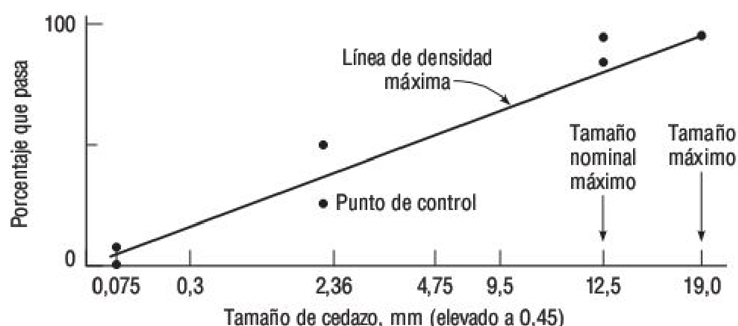


FIGURA 9.27 Límites granulométricos de Superpave para un tamaño máximo nominal de 12,5 mm.

Selección del aglomerante El aglomerante se elige basándose en las temperaturas máxima y mínima del pavimento, como ya hemos explicado anteriormente. Además de los ensayos de especificación, es preciso medir la gravedad específica y la gravedad rotacional en función de la temperatura para el aglomerante asfáltico seleccionado. La gravedad específica es necesaria para el análisis del huecos. La relación viscosidad–temperatura se precisa para determinar las temperaturas requeridas de mezclado y compactación. El método de Superpave requiere mezclar el asfalto y los áridos a una temperatura a la que la viscosidad rotacional del aglomerante asfáltico sea de 0,170 ± 20 Pa · s y la temperatura de compactación se corresponda con una viscosidad de 0,280 ± 30 Pa · s.

Diseño de la estructura de los áridos después de seleccionar el árido, el aglomerante y los modificadores (si es que se utiliza alguno), se preparan probetas de prueba con tres granulometrías de árido y porcentajes de asfalto diferentes. Hay ecuaciones que permiten estimar el contenido de asfalto óptimo que hay utilizar en las probetas preparadas para determinar la estructura de áridos requerida. Sin embargo, estas ecuaciones son empíricas, y el diseñador tiene libertad para estimar el contenido en asfalto. Las probetas se compactan con un compactador giratorio Superpave (Figura 9.23) aplicando un ángulo de giro de 1,25 grados y una presión vertical constante de 600 kPa (87 psi). El número de giros utilizado para la compactación se determina basándose en el nivel de tráfico, como se muestra en la Tabla 9.9.

Como se muestra en la Tabla 9.9, el método Superpave reconoce tres etapas críticas de compactación: inicial, de diseño y máxima. El nivel de compactación de diseño, N_{des}, se corresponde con la compactación que cabe anticipar una vez completado el proceso de construcción. La compactación máxima, N_{max}, se corresponde con el nivel final de densidad que se obtendrá una vez que el pavimento haya estado sujeto al tráfico a lo largo de una serie de años. El nivel de compactación inicial, N_{ini}, se implementó como ayuda para la identificacion de mezclas "tiernas". Una mezcla tierna carece de estabilidad durante la construcción y, como consecuencia, se desplazará bajo los rodillos en

TABLA 9.9 Número de giros para niveles de tráfico específicos.

	Nivel de tráfico (10^6 ESAL*)			
	< 0,3	0,3 a 3	3 a 30	> 30
N_{ini}	6	7	8	9
N_{des}	50	75	115	125
N_{max}	75	100	160	205

*ESAL es una carga equivalente de un solo eje de 18.000 libras. Es un factor de diseño utilizado en el diseño de pavimentos, que tiene en cuenta tanto el volumen de tráfico como las cargas (Huang, 2004).

lugar de densificarse. Para la etapa inicial de determinación de la estructura de áridos requerida, las muestras se compactan con N_{des} giros. Las propiedades volumétricas se determinan midiendo la gravedad específica en seco G_{mb} de la mezcla compactada y la gravedad específica máxima teórica G_{mm} de una mezcla suelta que tenga el mismo contenido de asfalto y la misma composición de áridos. A continuación, se determinan los parámetros volumétricos, como VTM, VMA y VFA, y se comprueba que satisfacen los criterios especificados. En el método Superpave se evalúan también dos parámetros adicionales: el porcentaje de G_{mm} a N_{ini} y la relación polvo-contenido efectivo de aglomerante. El porcentaje de G_{mm} a N_{ini} se determina como

$$\text{Porcentaje } G_{mm,Nini} = \text{Porcentaje } G_{mm,Ndes} \frac{h_{des}}{h_{ini}} \tag{9.11}$$

donde h_{ini} y h_{des} son las alturas de la probeta para el número de giros inicial y de diseño, respectivamente. Observe que el porcentaje $G_{mm,Ndes}$ es igual a (100-VTM).

La relación polvo-aglomerante efectivo es el porcentaje de árido que pasa el cedazo de 0,075 mm (Nº 200) dividido entre el contenido efectivo de asfalto, y se calcula como:

$$P_{ba} = 100\left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb}G_{se}}\right)G_b \tag{9.12}$$

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100}\right)P_s \tag{9.13}$$

$$D/B = \frac{P_D}{P_{be}} \tag{9.14}$$

donde

D/B = relación polvo aglomerante
P_{ba} = porcentaje absorbido de aglomerante basado en la masa de los áridos
G_{sb} = gravedad específica en seco del árido
P_D = porcentaje de polvo, o % de árido que pasa el cedazo de 0,075 mm
P_{be} = porcentaje efectivo de contenido de aglomerante

El método Superpave requiere determinar las propiedades volumétricas para un VTM del 4%. Las muestras preparadas para la evaluación del contenido de árido de diseño no tienen necesariamente el contenido de aglomerante requerido para conseguir este nivel de huecos de aire. Por tanto, los resultados de la evaluación volumétrica se "corrigen" para ajustarlos a un 4% de huecos de aire, mediante las fórmulas:

$$P_{b,est} = P_{bt} - 0{,}4(4 - \text{VTM}_t) \tag{9.15}$$

$$\text{VMA}_{est} = \text{VMA}_t + C(4 - \text{VTM}_t) \tag{9.16}$$

$C = 0{,}1$ para $\text{VTM}_t < 4{,}0\%$ $\qquad C = 0{,}2$ para $\text{VTM}_t \geq 4{,}0\%$

TABLA 9.10 Criterios de diseño de la mezcla Superpave.

Huecos llenos de aire						4%
Relación polvo-contenido efectivo de asfalto[1]						0,6–1,2
Relación de resistencia a la tracción						80% min
	Tamaño máximo nominal (mm)					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
VMA mínimo (%)	11	12	13	14	15	16

Requisitos G_{mm} y VFA

ESAL en millones	Porcentaje de gravedad específica teórica máxima N_{ini}	N_{des}	$N_{máx}$	Porcentaje de huecos rellenos de asfalto[2,3,4]
< 0,3	≤ 91,5	96	≤ 98,0	70–80
0,3–3	≤ 90,5	96	≤ 98,0	65–78
3–10	≤ 89,0	96	≤ 98,0	65–75
10–30	≤ 89,0	96	≤ 98,0	65–75
≥ 30	≤ 89,0	96	≤ 98,0	65–75

Notas

1. El rango de la relación polvo-aglomerante va de 0,9 a 2,0 para mezclas de 4,75 mm.
2. Para mezclas con un tamaño de árido máximo nominal de 9,5 mm y VFA ≥ 3 millones, el rango de VFA es del 73 al 76% y para mezclas de 4,75 mm el rango va del 75 al 78%.
3. Para mezclas con un tamaño máximo nominal de 25 mm, el límite inferior del rango VFA será del 67% para niveles de tráfico <0,3 millones ESAL.
4. Para mezclas con un tamaño máximo nominal de árido de 37,5, el límite inferior del rango VFA será del 64% para todos los niveles de tráfico.

$$VFA_{est} = 100\frac{VMA_t - 4,0}{VMA_t} \tag{9.17}$$

$$P_{be,est} = P_{b,est} - \frac{P_s G_b (G_{se} - G_{sb})}{G_{se} G_{sb}} \tag{9.18}$$

$$D/B_{est} = \frac{P_D}{P_{be,est}} \tag{9.19}$$

donde

$P_{b,est}$ = contenido de aglomerante estimado ajustado
VMA_{est} = VMA ajustado
VMA_t = VMA determinada mediante el análisis volumétrico
VFA_{est} = VFA ajustado
VTM_t = VTM determinada mediante el análisis volumétrico
$P_{be,est}$ = porcentaje efectivo ajustado de aglomerante
D/B_{est} = relación ajustada polvo-aglomerante
P_D = porcentaje de árido que pasa por el cedazo de 0,075 mm

En la Ecuación 9.17, el porcentaje de huecos llenos de aire se asume como igual al 4,0%, que es el contenido de huecos de aire objetivo en el diseño de mezclas Superpave.

Los resultados ajustados de la evaluación de la estructura del árido se comparan con el diseño de mezclas Superpave, como se muestra en la Tabla 9.10.

La mezcla de áridos seleccionada será aquella cuyos parámetros volumétricos ajustados satisfagan todos los criterios. En caso de que más de una de las mezclas cumpla todos los criterios, el diseñador puede usar su buen juicio para la selección de la mezcla. Una vez elegida la mezcla de áridos, se compactan un par de muestras para el contenido de aglomerante ajustado. Entonces se determina el valor porcentual medio de la gravedad específica máxima teórica y se compara con los criterios de diseño. Si la comparación resulta adecuada, el proceso continúa con la determinación del contenido de aglomerante requerido. Si al comparar se comprueba que no se pasan los criterios de diseño, se vuelve a iniciar el proceso de diseño con la selección de otra mezcla de áridos.

Problema de ejemplo 9.4

Seleccione un estructura de áridos de 19 mm para Superpave basándose en los datos siguientes:

	Mezcla		
Datos	**1**	**2**	**3**
G_{mb}	2,457	2,441	2,477
G_{mm}	2,598	2,558	2,664
G_b	1,025	1,025	1,025
P_b (%)	5,9	5,7	6,2
P_s (%)	94,1	94,3	93,8
P_d (%)	4,5	4,5	4,5
G_{sb}	2,692	2,688	2,665
h_{ini} (mm)	125	131	125
h_{des} (mm)	115	118	115

Análisis volumétrico

Calculado	Ecuación		Usando los datos para la mezcla 1	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
G_{se}	9.6	$\frac{P_s}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}\right)}$	$\frac{94{,}1}{\left(\frac{100}{2{,}598} - \frac{5{,}9}{1{,}025}\right)}$	2,875	2,812	2,979
VTM (%)	9.8	$100\left(1-\frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right)$	$100\left(1-\frac{2{,}457}{2{,}598}\right)$	5,4	4,6	7,0
VMA (%)	9.9	$\left(100-G_{mb}\frac{P_s}{G_{sb}}\right)$	$\left(100-2{,}457\frac{94{,}1}{2{,}692}\right)$	14,1	14,4	12,8
VFA (%)	9.10	$100\left(\frac{VMA-VTM}{VMA}\right)$	$100\left(\frac{14{,}1-5{,}4}{14{,}1}\right)$	61,7	68,1	45,3
% $G_{mm,Nini}$	9.11	Porcentaje $G_{mm,Ndes}\frac{h_{des}}{h_{ini}}$	$94{,}6\frac{115}{125}$	87,0	86,0	85,5
P_{ba} (%)	9.12	$100\left(\frac{G_{se}-G_{sb}}{G_{sb}G_{se}}\right)G_b$	$100\left(\frac{2{,}875-2{,}692}{2{,}692 * 2{,}875}\right)1{,}025$	2,42	1,68	4,05
P_{be} (%)	9.13	$P_b-\left(\frac{P_{ba}}{100}\right)P_s$	$5{,}9-\left(\frac{2{,}42}{100}\right)94{,}1$	3,62	4,12	2,4
D/B	9.14	$\frac{P_D}{P_{be}}$	$\frac{4{,}5}{3{,}62}$	1,2	1,1	1,9

(*Continúa*)

Análisis volumétrico

Calculado	Ecuación		Usando los datos para la mezcla 1	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Criterios
Valores ajustados							
$P_{b,est}$ (%)	9.15	$P_{bt} - 0,4(4 - \text{VTM}_t)$	$5,9 - 0,4(4 - 5,4)$	6,5	5,9	7,4	
VMA_{est} (%)	9.16	$\text{VMA}_t + C(4 - \text{VTM}_t)$	$14,1 + 0,2(4 - 5,4)$	13,8	14,3	12,2	≥ 13
VFA_{est} (%)	9.17	$100\dfrac{\text{VMA}_t - 4,0}{\text{VMA}_t}$	$100\dfrac{13,8 - 4,0}{13,8}$	71,0	72,0	67,2	65–75
$P_{be,est}$ (%)	9.18	$P_{b,est} - \dfrac{P_s G_b (G_{se} - G_{sb})}{G_{se} G_{sb}}$	$6,5 - \dfrac{94,1 * 1,025(2,875 - 2,692)}{2,875 * 2,692}$	4,2	4,3	3,6	
D/B_{est}	9.19	$\dfrac{P_D}{P_{be,est}}$	$\dfrac{4,5}{4,2}$	1,1	1,0	1,3	0,8–1,2

Solución

En este problema, introducimos los datos de laboratorio en una hoja de cálculo Excel y las formúlas apropiadas, obteniendo los resultados mostrados en las tablas de las dos páginas anteriores. Se especifican los pasos de los cálculos únicamente para la primera mezcla; el lector puede verificar los cálculos para las demás mezclas.
Aunque las mezclas 1 y 2 satisfacen los criterios, seleccionaremos la mezcla 2, ya que tiene un valor VMA más alto.

Contenido de aglomerante El contenido de aglomerante se determina preparando ocho probetas: dos réplicas de cada uno de cuatro contenidos de aglomerante. Esos cuatro contenidos de aglomerante se determinan de la forma siguiente: el contenido de aglomerante estimado óptimo, un 0,5% menos que el óptimo, un 0,5% más que el óptimo y un 1% más que el óptimo. Las probetas se compactan utilizando N_{des} giros. Las propiedades volumétricas se calculan y, a continuación, se elaboran los diagramas de cada parámetro volumétrico en función del contenido de aglomerante. Después, se determina el contenido de aglomerante correspondiente a un VTM del 4%. A continuación, se utilizan los diagramas para determinar los parámetros volumétricos del contenido de aglomerante seleccionado. Si las propiedades cumplen los criterios indicados en la Tabla 9.10, se preparan dos probetas y se compactan utilizando N_{max} giros. Si estas probetas satisfacen los criterios, se pasa a determinar la sensibilidad a la humedad de la mezcla.

Problema de ejemplo 9.5

Basándose en le problema anterior, determine el contenido de asfalto recomendado de acuerdo con el diseño de mezclas Superpave, para una carga equivalente de un único eje (ESAL) igual a 20 millones.

Solución

Se preparan muestras con cuatro contenidos de asfalto. A continuación, se prepara una hoja de cálculo Excel para presentar y analizar los datos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Contenido de aglomerante

	Contenido de asfalto de prueba			
Datos	**1**	**2**	**3**	**4**
P_b (%)	5,4	5,9	6,4	6,9
G_{mb}	2,351	2,441	2,455	2,469
G_{mm}	2,570	2,558	2,530	2,510
G_b	1,025	1,025	1,025	1,025
P_s (%)	94,6	94,1	93,6	93,1
P_d (%)	4,5	4,5	4,5	4,5
G_{sb}	2,688	2,688	2,688	2,688
h_{ini} (mm)	125	131	126	130
h_{des} (mm)	115	118	114	112

Contenido de aglomerante

Análisis volumétrico

		Contenido de asfalto de prueba			
Cálculo	**Ecuación**	**1**	**2**	**3**	**4**
G_{se}	9.6	2,812	2,812	2,812	2,812
VTM (%)	9.8	8,5	4,6	3,0	1,6
VMA (%)	9.9	17,3	14,5	14,5	14,5
VFA (%)	9.10	50,9	68,3	79,3	89,0
% $G_{mm}N_{ini}$	9.11	84,2	86,0	87,8	84,7
P_{ba} (%)	9.12	1,68	1,68	1,68	1,68
P_{be} (%)	9.13	3,81	4,32	4,83	5,34
D/B	9.14	1,2	1,0	0,9	0,8

Los resultados se dibujan en las gráficas correspondientes en función del contenido de asfalto, como se muestra en la Figura PE9.5.

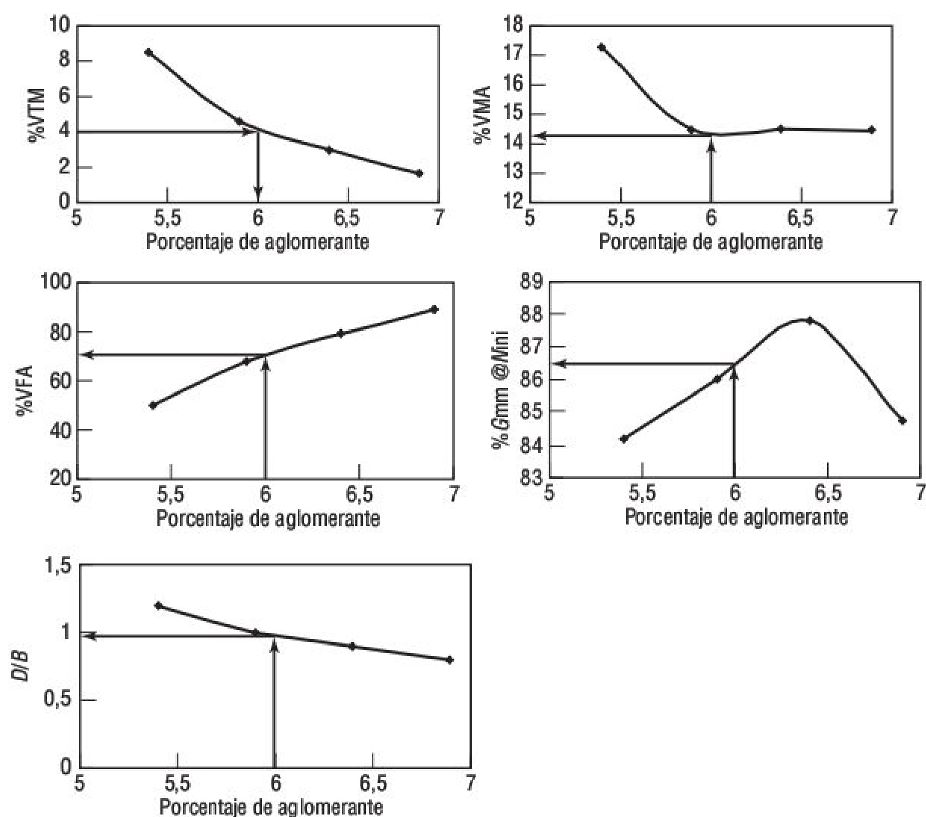


FIGURA PE9.5

La figura muestra que, para un VTM del 4%, el contenido de aglomerante es del 6%. Los valores de diseño para un contenido de aglomerante del 6% son:

- VMA = 14,5%
- VFA = 71%
- G_{mm} y N_{ini} = 86,5%
- Relación D/B = 0,9

Estos valores satisfacen los criterios de diseño mostrados en la Tabla 9.10. Por tanto, el contenido de aglomerante será del 6,0%.

Evaluación de la sensibilidad a la humedad La sensibilidad a la humedad de la mezcla especificada se determina mediante el procedimiento AASHTO T283 sobre seis probetas preparadas para el contenido de aglomerante especificado y un 7% de huecos rellenos de aire. Tres de las probetas se acondicionan mediante saturación en vacío y posterior congelación y descongelación; las otras tres probetas no se acondicionan. Se mide la resistencia a la tracción de la muestra utilizando una máquina de estabilidad de Marshall con una cabeza de carga modificada. La relación de la resistencia a la tracción se determina dividiendo el valor promedio de la resistencia a la tracción de las probetas acondicionadas entre el valor promedio correspondiente a las probetas no acondicionadas. El criterio mínimo establecido por Superpave para la relación de la resistencia a la tracción es del 80%.

9.9.4 Pruebas simples de comportamiento (SPT) de Superpave

El procedimiento volumétrico se ha implementado ampliamente, obteniendo resultados satisfactorios. Sin embargo, el método carece de una prueba resistencia para verificar la adecuación de las mezclas Superpave. Las investigaciones completadas dentro del proyecto 9-19 del NCHRP han permitido identificar tres pruebas simples de comportamiento (STP, *Simple Performance Tests*) para el asfalto de mezcla en caliente (Witczak *et al.*, 2002). Una serie de pruebas basadas en la medida del módulo dinámico (tanto para la deformación permanente como para el agrietamiento por fatiga), el tiempo de flujo (deformación permanente) y el número de flujo (deformación permanente) se seleccionaron en ese proyecto para ulteriores validaciones experimentales. Las tres pruebas empleadas para obtener estos parámetros son la prueba del módulo dinámico, la prueba de reptación estática triaxial y la prueba de deformación permanente mediante carga repetida triaxial. Todos estos ensayos utilizan probetas cilíndricas de 100 mm (4 pulgadas) de diámetro y 150 mm (6 pulgadas) de altura. Las probetas se extraen en el laboratorio a partir de otra serie de probetas compactadas mediante el compactador giratorio Superpave (Figura 9.23). La Figura 9.28 muestra una fotografía del equipo SPT.

Prueba del módulo dinámico La prueba del módulo dinámico en compresión triaxial se ha estado utilizando en el sector de los pavimentos durante muchos años (ASTM D3497).



FIGURA 9.28 Equipo para pruebas simples de comportamiento Superpave.

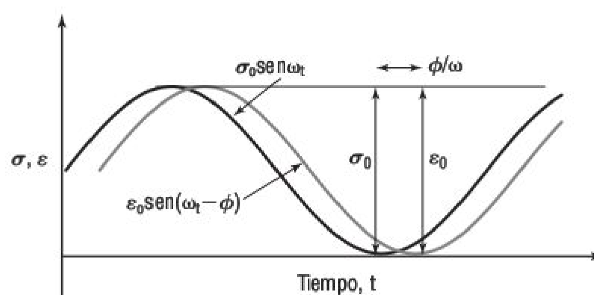


FIGURA 9.29 Pulsos de esfuerzo y deformación para la prueba de módulo dinámico.

La prueba consiste en aplicar un esfuerzo de compresión sinusoidal axial a una probeta cilíndrica de asfalto de mezcla en caliente, confinada o no confinada, como se muestra en la Figura 9.29.

Suponiendo que el asfalto de mezcla en caliente es un material viscoelástico lineal, podemos definir a partir de la prueba un número complejo, denominado módulo complejo, E^*, que define la relación existente entre el esfuerzo y la deformación. El valor absoluto del módulo complejo, $|E^*|$, se denomina módulo dinámico, el cual se define matemáticamente como el esfuerzo dinámico de pico σ_o dividido entre la deformación axial recuperable de pico, ε_0.

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_0} \tag{9.20}$$

Las partes real e imaginaria del módulo complejo E^* pueden escribirse como:

$$E^* = E' + iE'' \tag{9.21)}$$

Generalmente, E' se denomina componente de almacenamiento o de módulo elástico del módulo complejo, mientras que E'' se denomina componente de pérdida o de módulo viscoso. El ángulo de fase ϕ es el ángulo que ε_0 está retardado con respecto a σ_o. Es un indicador de las propiedades viscosas del material que está siendo evaluado. Matemáticamente, esto se expresa como

$$E^* = |E^*|\cos\phi + i|E^*|\operatorname{sen}\phi \tag{9.22}$$

donde

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360$$

t_i = retardo temporal entre el esfuerzo y la deformación, s
t_p = tiempo correspondiente a un ciclo de esfuerzo, s
i = número imaginario

Para un material elástico puro, $\phi = 0$, y el módulo complejo E^* es igual al valor absoluto, o módulo dinámico. Para un material puramente viscoso, $\phi = 90°$.

El módulo dinámico obtenido mediante esta prueba es indicativo de la rigidez de la mezcla asfáltica a la temperatura seleccionada y para la frecuencia de carga dada. El módulo de dinámico guarda una correlación tanto con la aparición de rodadas como con el agrietamiento por fatiga del asfalto mezclado en caliente.

Prueba de reptación estática triaxial En la prueba de reptación estática de compresión, en el laboratorio se determina una relación de la deformación total en función del tiempo para una mezcla, en condiciones confinadas o no confinadas. La prueba de reptación estática, que utiliza un ciclo de carga–descarga o una serie de ciclos de carga–descarga incrementales, proporciona suficiente información para determinar las componentes instantáneas (independientes del tiempo) elástica (recuperable) y plástica (irrecuperable), así como las componentes viscoelástica y viscoplástica (dependientes del tiempo) de la respuesta del material. En este ensayo, la función de cumplimiento, $D(t)$, se determina dividiendo la deformación en función del tiempo $\varepsilon(t)$ entre el esfuerzo constante aplicado σ_o.

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_o} \tag{9.23}$$

La Figura 9.30 muestra una serie de resultados típicos de prueba que presentan la relación entre la función de cumplimiento calculada y el tiempo de carga. Como puede

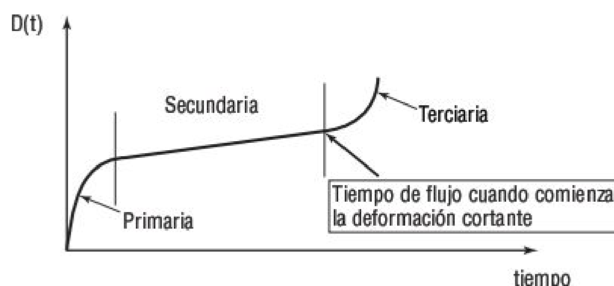


FIGURA 9.30 Cumplimiento en función del tiempo de carga, para la prueba de reptación estática triaxial.

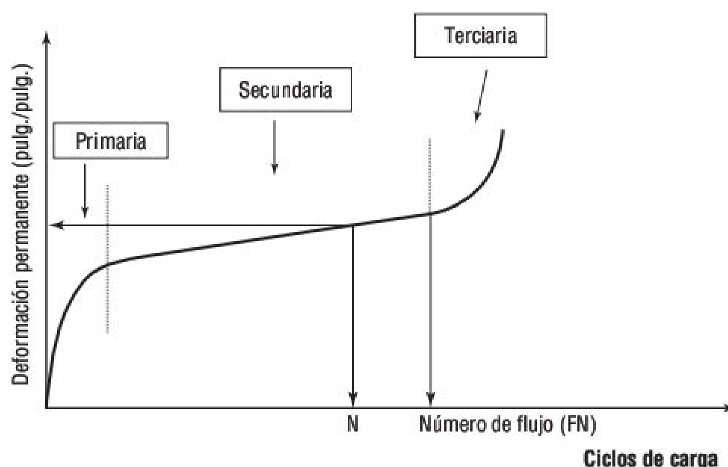


FIGURA 9.31 Relación típica entre la deformación plástica acumulativa total y los ciclos de carga.

verse, el cumplimiento puede dividirse en tres zonas: zona primaria, zona secundaria y zona de flujo terciario. El instante en el que comienza el flujo terciario se denomina *tiempo de flujo*, que es un parámetro significativo a la hora de evaluar la resistencia a las rodadas del asfalto de mezcla en caliente.

Prueba de deformación permanente bajo carga repetida triaxial Otra técnica para medir las características de deformación permanente del asfalto de mezcla en caliente consiste en usar una prueba de carga repetida durante varios miles de repeticiones y registrar la deformación permanente acumulada en función del número de repeticiones de la carga. En esta prueba, se aplica una carga impulsiva en medio senoverso que queda definida por 0,1 segundos de aplicación y 0,9 segundos de tiempo de parada; esa carga se aplica típicamente durante tres horas o 10.000 ciclos de carga.

Los resultados de las pruebas de carga repetida suelen presentarse indicando la deformación permanente acumulada en función del número de ciclos de carga. La Figura 9.31 ilustra una relación típica entre la deformación plástica acumulada y el número

total de ciclos de carga utilizados. De forma similar a la prueba de reptación estática triaxial, la curva de deformación permanente puede dividirse en tres zonas: primaria, secundaria y terciaria. El número de ciclo en el que da comienzo el ciclo terciario se denomina *número de flujo*. Además del número de flujo, la prueba permite determinar la deformación resiliente y el módulo resiliencia, los cuales guardan una correlación con la resistencia a la aparición de rodadas del asfalto de mezcla en caliente

9.9.5 Método Marshall para el diseño de mezclas

Los pasos básicos requeridos para realizar una mezcla según el método Marshall son los siguientes (Instituto del asfalto, 1995):

1. Evaluación de los áridos.
2. Evaluación del cemento asfáltico.
3. Preparación de las probetas.
4. Medida del flujo y de la estabilidad de Marshall.
5. Análisis de densidad y de huecos.
6. Determinación del contenido de asfalto de la mezcla.

1. **Evaluación de los áridos** Entre las características de los áridos que hay que evaluar antes de poder utilizarlos para una mezcla de hormigón asfáltico se incluyen la durabilidad, la consistencia, la presencia de sustancias deletéreas, el pulido, la forma y la textura. Las especificaciones de los organismos reguladores definen los rangos aceptables relativos a la granulometría del árido. El método Marshall es aplicable a áridos con una granulometría densa y un tamaño máximo de no más de 25 mm (1 pulgada).

2. **Evaluación del cemento asfáltico** El grado del cemento asfáltico se selecciona basándose en el rango de temperatura y las condiciones de tráfico esperados. La mayoría de los organismos reguladores tienen especificaciones que prescriben el grado del asfalto en función de las condiciones de diseño.

3. **Preparación de las probetas** El procedimiento completo de diseño de mezclas por el método Marshall requiere 18 probetas de 101,6 mm (4 pulgadas) de diámetro y 63,5 mm (2,5 pulgadas) de altura. Se miden la estabilidad y el flujo para 15 probetas. Además, se usan tres probetas para determinar la gravedad específica máxima teórica G_{mm}. Este valor es necesario para el análisis de huecos y de la densidad. Las probetas para la determinación de la gravedad específica máxima teórica se preparan con el contenido de asfalto estimado para el diseño. También se requieren muestras para un total de cinco contenidos de asfalto diferentes: el contenido de asfalto especificado para el diseño, el ±0,5% y el ±1,0%. Los ingenieros deben aplicar su experiencia y buen juicio para estimar el contenido de asfalto del diseño.

   La preparación de las muestras para el método Marshall incluye el uso del compactador de Marshall presentado anteriormente (Figura 9.24). El método Marshall requiere mezclar el asfalto y los áridos a una temperatura en la que la viscosidad



FIGURA 9.32 Máquina de estabilidad de Marshall.

cinemática del cemento asfáltico sea igual a 170 ± 20 cSt y la temperatura de compactación se corresponda con una viscosidad de 280 ± 30 cSt.

El Instituto del asfalto permite utilizar tres niveles distintos de energía para la preparación de las probetas: 35, 50 y 75 golpes en cada cara de la muestra. La mayoría de los diseños de mezclas para pavimentos de gran uso emplean 75 golpes, ya que este valor permite simular mejor la densidad requerida para la construcción de pavimentos.

4. **Medida del flujo y de la estabilidad de Marshall** La estabilidad de Marshall del hormigón asfáltico es la carga máxima que el material puede soportar cuando se prueba en el aparato de Marshall, mostrado en la Figura 9.32. El ensayo se realiza con una velocidad de deformación de 51 mm/min. (2 pulgadas/min.) y a una temperatura de 60°C (140° F). El flujo de Marshall es la deformación de la probeta cuando la carga comienza a disminuir. La estabilidad se mide en Newtons (libras) y el flujo se mide en unidades de 0,25 mm (0,01 pulgadas) de deformación. La estabilidad de las probetas que no tengan un espesor de 63,5 mm se ajusta multiplicando por los factores especificados en la Tabla 9.11. En el método Marshall se prueban todas las probetas y se determina el valor promedio de estabilidad y de flujo para cada contenido de asfalto.
5. **Análisis de densidad y de huecos** Se determinan los valores de VTM, VMA y VFA utilizando las Ecuaciones 9.8, 9.9 y 9.10, respectivamente.
6. **Determinación del contenido de asfalto de la mezcla** Tradicionalmente, los resultados de las pruebas y de los cálculos se tabulan y se dibujan en un diagrama para ayudar a determinar los factores que hay que utilizar a la hora de seleccionar el contenido de asfalto óptimo. La Tabla 9.12 presenta varios ejemplos de cálculos y

TABLA 9.11 Factores de ajuste para la estabilidad de Marshall.

Espesor aproximado de la probeta, mm (pulg.)	Factor de ajuste	Espesor aproximado de la probeta, mm (pulg.)	Factor de ajuste
50,8 (2)	1,47	65,1 (2 9/16)	0,96
52,4 (2 1/16)	1,39	66,7 (2 5/8)	0,93
54,0 (2 1/8)	1,32	68,3 (2 11/16)	0,89
55,6 (2 3/16)	1,25	69,8 (2 3/4)	0,86
57,2 (2 1/4)	1,19	71,4 (2 13/16)	0,83
58,7 (2 5/16)	1,14	73,0 (2 7/8)	0,81
60,3 (2 3/8)	1,09	74,6 (2 15/16)	0,78
61,9 (2 7/16)	1,04	76,2 (3)	0,76
63,5 (2 1/2)	1,00		

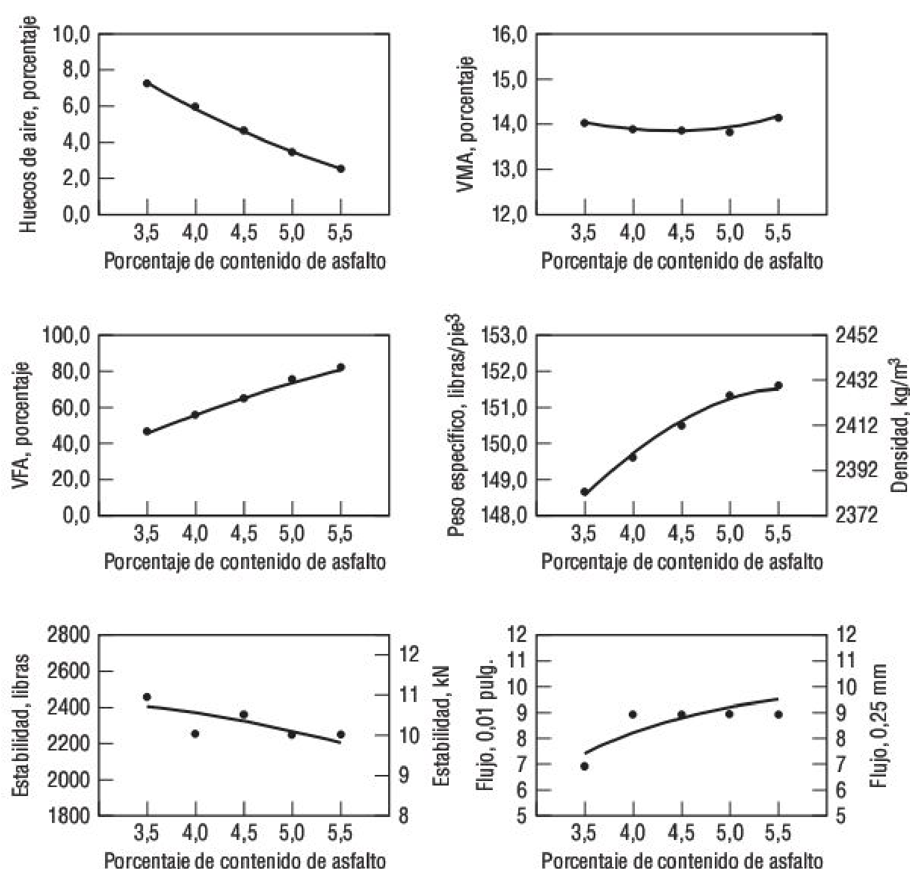


FIGURA 9.33 Gráficos utilizados para el análisis del diseño de mezclas por el método Marshall (véase la Tabla 9.12) (Instituto del asfalto, 1995).

TABLA 9.12 Ejemplos de cálculos y medidas para el diseño de mezclas mediante el método de Marshall (Instituto del asfalto, 1995)

% Cont. asfalto en peso de la mezcla. Nº espec.	Alt. espec., mm	Peso en aire, g	Peso en agua, g	Peso SSD g	Vol. aparente cm^3	Grav. espec. aparente	Grav. espec. máx, teo. (mezcla suelta)	% Huecos aire	% VMA	% VFA	Estabilidad medida, kN	Estabilidad ajustada, kN	Flujo, 0,25 mm
3.5–A		1240,6	726,4	1246,3	519,9	2,386					10,9	10,9	8
3.5–B		1238,7	723,3	1242,6	519,3	2,385					10,8	10,8	7
3.5–C		1240,1	724,1	1245,9	521,8	2,377					11,2	11,2	7
Promedio						2,383	2,570	7,3	14,0	48,0		10,9	7
4.0–A		1244,3	727,2	1246,6	519,4	2,396					9,7	9,7	9
4.0–B		1244,6	727,0	1247,6	520,6	2,391					10,1	10,1	9
4.0–C		1242,6	727,9	1244,0	516,1	2,408					10,3	10,3	8
Promedio						2,398	2,550	6,0	13,9	57,1		10,0	9
4.5–A		1249,3	735,8	1250,2	414,4	2,429					10,8	10,8	9
4.5–B		1250,8	728,1	1251,6	523,5	2,389					10,7	10,3	9
4.5–C		1251,6	735,3	1253,1	517,8	2,417					10,4	10,4	9
Promedio						2,412	2,531	4,7	13,9	66,1		10,5	9
5.0–A		1256,7	739,8	1257,6	517,8	2,427					10,2	10,2	9
5.0–B		1258,7	742,7	1259,3	516,6	2,437					9,7	9,7	8
5.0–C		1258,4	737,5	1259,1	521,6	2,413					10,0	10,0	9
Promedio						2,425	2,511	3,4	13,8	75,2		10,0	9
5.5–A		1263,8	742,6	1264,3	521,7	2,422					9,8	9,8	9
5.5–B		1258,8	741,4	1259,4	518,0	2,430					10,2	10,2	10
5.5–C		1259,0	742,5	1259,5	517,0	2,435					9,8	10,0	9
Promedio						2,429	2,493	2,5	14,1	82,1		10,0	9

Notas: aglomerante AC-20, G_b = 1,030, G_b =2,674, Contenido asfáltico absorbido por el árido: 0,6%, G_{se} = 2,7171. Compactación: 75 golpes.

medidas para el diseño de la mezcla. La Figura 9.33 muestra los diagramas correspondientes a los resultados obtenidos en la Tabla 9.12, en la que se incluye el contenido de asfalto en función de los huecos de aire, del VMA, del VFA, del peso específico, de la estabilidad de Marshall y del flujo de Marshall.

El contenido de asfalto especificado será normalmente el más económico que permita cumplir satisfactoriamente todos los criterios establecidos. Los distintos organismos reguladores utilizan criterios distintos. Las Tablas 9.13 y 9.14 muestran los criterios

TABLA 9.13 Criterios del Instituto del asfalto para el diseño de mezclas por el método Marshall (Instituto del asfalto, 1995).

	Nivel de tráfico					
	Ligero		Medio		Pesado	
Compactación (golpes)	35		50		75	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Estabilidad, kN	3,34	—	5,34	—	8,01	—
Flujo, 0,25 mm	8	18	8	16	8	14
Huecos de aire, %	3	5	3	5	3	5
VMA, %	Utilice el criterio de la Tabla 9.14					
VFA, %	70	80	65	78	65	75

TABLA 9.14 Porcentaje mínimo de huecos en el árido mineral (VMA) (Instituto del asfalto, 1995)

Tamaño máximo nominal de las partículas[1]	VMA mínimo, porcentaje Porcentaje de huecos de aire[2] 3,0	4,0	5,0
2,36 mm (Nº 8)	19,0	20,0	21,0
4,75 mm (Nº 4)	16,0	17,0	18,0
9,5 mm (3/8 pulg.)	14,0	15,0	16,0
12,5 mm (1/2 pulg.)	13,0	14,0	15,0
19,0 mm (3/4 pulg.)	12,0	13,0	14,0
25,0 mm (1,0 pulg.)	11,0	12,0	13,0

[1]El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño mayor que el primer cedazo capaz de retener más de un 10%.
[2]Interpole el VMA mínimo para los porcentajes de huecos de aire comprendidos entre los indicados.

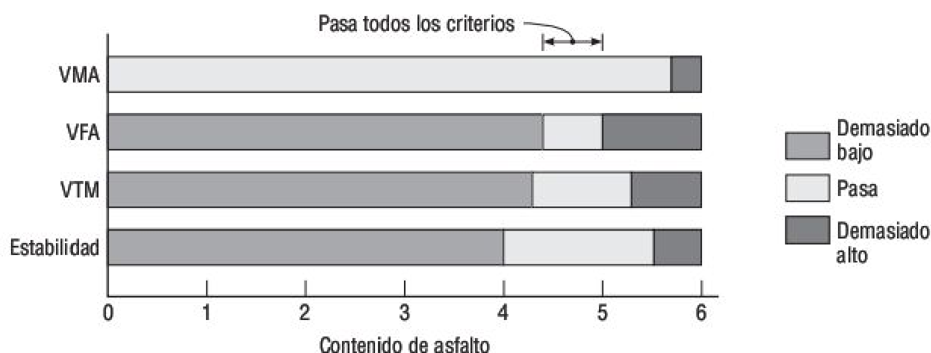


FIGURA 9.34 Ejemplo del estrecho rango de contenidos aceptables de asfalto (Instituto del asfalto, 1995).

de diseño de mezclas recomendados por el Instituto del asfalto. La Figura 9.34 muestra un ejemplo del estrecho rango de contenidos de asfalto aceptables. La selección del contenido de asfalto puede ajustarse dentro de este estrecho rango, con el fin de obtener una mezcla que satisfaga los requisitos especificados. Otros organismos, como la Asociación Nacional de pavimentación asfáltica de Estados Unidos, utiliza el contenido de cemento asfáltico para un 4% de huecos de aire como valor especificado de diseño y luego comprueba si los otros factores satisfacen los criterios. Si la estabilidad de Marshall, el flujo de Marshall, el VMA y el VFA caen fueran del rango admisible, es necesario rediseñar la mezcla utilizando una granulometría de árido ajustada o nuevas fuentes de materiales.

El diseño de mezclas especificado en el laboratorio constituye la base para la fórmula inicial de mezcla del proyecto (JMF, *Job Mix Formula*). La fórmula JMF inicial debe ajustarse para reflejar las ligeras diferencias existentes entre los áridos suministrados en el laboratorio y los utilizados en la obra.

Problema de ejemplo 9.6

Se utiliza el método Marshall para diseñar una mezcla de hormigón asfáltico con un cemento asfáltico AC-30 de gravedad específica (G_b) igual a 1,031. La mezcla contiene un árido con un tamaño máximo nominal de partículas igual a 9,5 mm y una gravedad específica en seco (G_{sb}) de 2,696. La gravedad específica máxima teórica de la mezcla (G_{mm}) para un contenido de asfalto del 5,0% es 2,470. Se hacen una serie de mezclas de prueba, obteniéndose los resultados promedio que se detallan en la tabla de la página siguiente.
Determine el contenido de asfalto de la mezcla utilizando los criterios de diseño del Instituto del asfalto para un tráfico de volumen medio (Tabla 9.13). Suponga un contenido de huecos de aire del 4% cuando utilice la Tabla 9.14.

Solución:

Pasos del análisis:

1. Determinación de la gravedad específica efectiva de los áridos G_{se}, aplicando la Ecuación 9.6:

Contenido de asfalto (P_b) (% en peso de la mezcla)	Gravedad específica en seco (G_{mb})	Estabilidad corregida (kN)	Flujo (0,25 mm)
4,0	2,360	6,3	9
4,5	2,378	6,7	10
5,0	2,395	5,4	12
5,5	2,405	5,1	15
6,0	2,415	4,7	22

$$G_{se} = \frac{P_s}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}\right)} = \frac{100 - 5{,}0}{\left(\frac{100}{2{,}470} - \frac{5{,}0}{1{,}031}\right)} = 2{,}666$$

Los cálculos de los pasos 2–5 son para un 4,0% de contenido de asfalto y se facilitan como ejemplo. Repita los cálculos para otros contenidos de asfalto.

2. Utilice G_{se} para determinar G_{mm} para los otros contenidos de asfalto aplicando la Ecuación 9.5:

$$G_{mm} = \frac{100}{\left(\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}\right)} = \frac{100}{\left(\frac{100 - 4{,}0}{2{,}666} + \frac{4{,}0}{1{,}031}\right)} = 2{,}507$$

3. Utilizando la Ecuación 9.8, calcule los huecos de la mezcla total para cada contenido de asfalto:

$$\text{VTM} = 100\left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) = 100\left(1 - \frac{2{,}360}{2{,}507}\right) = 5{,}9$$

4. Calcule los huecos en el árido mineral, utilizando la Ecuación 9.9:

$$\text{VMA} = 100 - \left(G_{mb}\, {}^{P_s}\!/_{G_{sb}}\right) = 100 - \left(2{,}360 \times \frac{(100 - 4{,}0)}{2{,}696}\right) = 16{,}0$$

5. Calcule los huecos rellenos de asfalto utilizando la Ecuación 9.10:

$$\text{VFA} = 100\,\frac{(\text{VMA} - \text{VTM})}{\text{VMA}} = 100\,\frac{(16{,}0 - 5{,}9)}{16{,}0} = 63{,}3$$

6. En la siguiente tabla se proporciona un resumen de todos los cálculos:

P_b (%)	G_{mb}	Estabilidad corregida (kN)	Flujo, (0,25 mm)	G_{mm}	G_{se}	VTM (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,0	2,360	6,3	9	2,507		5,9	16,0	63,3
4,5	2,378	6,7	10	2,488		4,4	15,8	71,9
5,0	2,395	5,4	12	2,470	2,666	3,0	15,6	80,5
5,5	2,405	5,1	15	2,452		1,9	15,7	87,8
6,0	2,415	4,7	22	2,434		0,8	15,8	95,0

7. Dibuje la estabilidad, el flujo y los parámetros volumétricos en función de P_b (véase la Figura PE9.6).
8. Determine el contenido de asfalto que se corresponde con VTM = 4% y los correspondientes parámetros.

   Haga una comparación con los criterios:

	De las gráficas	Criterios
P_b @ 4%	4,6	
Estabilidad (kN)	6,6	5,34 (min)
Flujo (0,25 mm)	10,5	8 a 16
G_{mb}	2,383	NA
VMA (%)	15,7	15,0 (min)
VFA (%)	75	65 a 78

Por tanto, el contenido de asfalto de la mezcla será del 4,6%.

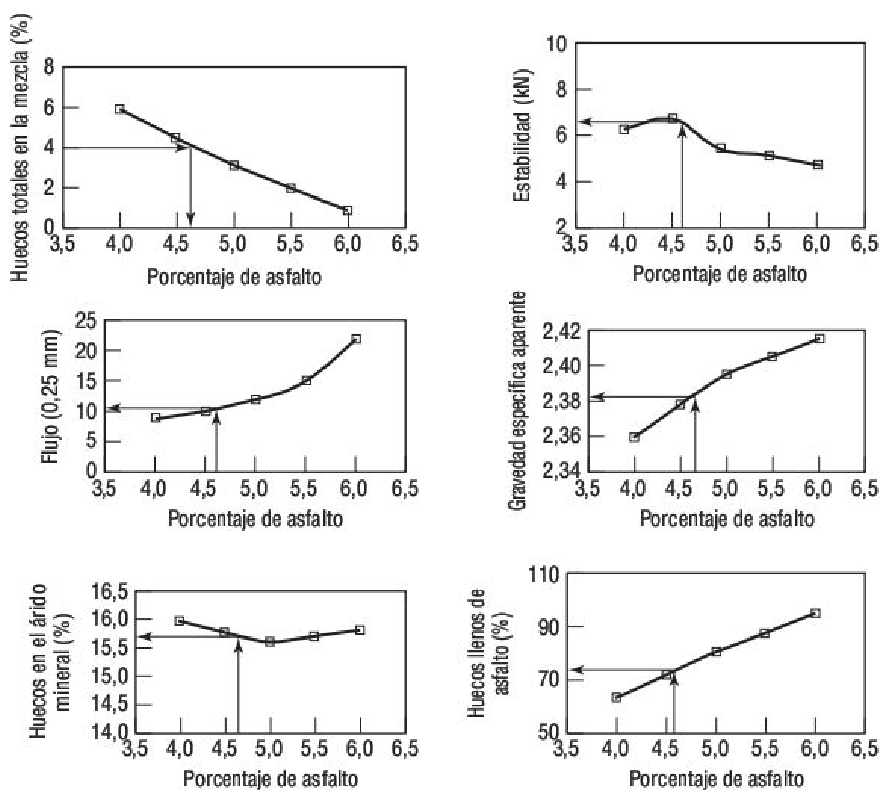


FIGURA PE9.6

9.9.6 Método Hveem para el diseño de mezclas

Los pasos básicos requeridos para diseñar una mezcla con el método Hveem son los siguientes (Instituto del asfalto, 1995):

1. Evaluación de los áridos.
2. Evaluación del cemento asfáltico.
3. Evaluación del equivalente centrífugo de queroseno del árido fino.
4. Evaluación de la capacidad superficial del árido grueso.
5. Estimación del contenido óptimo de asfalto.
6. Preparación de las probetas.
7. Medida de la estabilidad de Hveem.
8. Análisis de densidad y de huecos.
9. Determinación del contenido de asfalto de la mezcla.

La evaluación de los áridos y del cemento asfáltico se realiza como en el método Marshall para el diseño de mezclas. El método Hveem requiere medir las propiedades de los áridos y usar una serie de diagramas para estimar el contenido de asfalto de la mezcla (Instituto del asfalto, 1995).

Se preparan tres probetas cilíndricas de 102 mm (4 pulgadas) de diámetro y 63,5 mm (2,5 pulgadas) de altura, utilizando un compactador amasador California (Figura 9.25), de acuerdo con ASTM D1561. Para fabricar las probetas, se emplean tres contenidos de asfalto próximos al valor estimado de diseño. Se determina la estabilidad Hveem de las probetas utilizando el estabilómetro Hveem (Figura 9.35), de acuerdo con la norma ASTM D1560. El estabilómetro Hveem es un dispositivo que permite aplicar una presión lateral sobre la probeta al mismo tiempo que se aplica una carga vertical mediante una máquina de compresión.



FIGURA 9.35 Estabilómetro Hveem.

Como en el método de Marshall, se determinan la gravedad específica en seco, la gravedad específica máxima teórica, el porcentaje de huecos de aire (VTM) y la densidad de todas las probetas. La estabilidad Hveem, la densidad y los huecos de aire se tabulan y se dibujan en función del contenido de asfalto. El contenido de asfalto óptimo para la mezcla deberá ser el más alto que la mezcla permite sin que se reduzcan la estabilidad o el contenido de huecos por debajo de los valores mínimos dictados por los criterios de diseño.

La mezcla desarrollada en el laboratorio constituye la base para la fórmula JMF inicial, la cual se ajustará para tener en cuenta las ligeras diferencias existentes entre los áridos empleados en el laboratorio y los utilizados en la obra.

9.9.7 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

Puesto que la pérdida de la unión entre el asfalto y los áridos (*stripping*) se ha convertido en una forma bastante significativa de fallo en los pavimentos asfálticos, se han desarrollado diversos métodos para evaluar la susceptibilidad de una mezcla a los daños provocados por el agua. La mayoría de los métodos populares requieren que las probetas contengan el contenido óptimo de asfalto y que la mezcla sea de granulometría correcta.

Las probetas se dividen en dos lotes: probetas de referencia y probetas acondicionadas. Se utiliza una prueba de resistencia para evaluar la resistencia antes y después del acondicionamiento; con ello se calcula la resistencia retenida, que es la relación entre la resistencia acondicionada y la resistencia de referencia, expresada como porcentaje. Se aplican una serie de criterios para determinar si la resistencia retenida es adecuada. Las diferentes técnicas para evaluar la susceptibilidad a la humedad varían dependiendo de la preparación de las probetas, de los procedimientos de acondicionamiento y de la resistencia.

El ensayo de inmersión–compresión (ASTM D1075) se ha utilizado para evaluar la susceptibilidad a la humedad. El método evalúa la resistencia retenida a la compresión después de una saturación por vacío. Otros métodos emplean probetas de Marshall, congelando y remojando en agua las muestras para acondicionarlas y determinando la resistencia diametral y los valores de módulo con el fin de evaluar la resistencia retenida. La congelación de las muestras incrementa enormemente la severidad del ensayo.

Existen diversas formas de modificar la susceptibilidad del hormigón asfáltico a los daños provocados por el agua. Entre los métodos identificados por el Instituto del asfalto se incluyen:

1. Incrementar el contenido de asfalto.
2. Utilizar un cemento asfáltico de mayor viscosidad.
3. Limpiar los áridos de cualquier tipo de polvo o arcilla.
4. Agregar aditivos para mejorar la adherencia.
5. Alterar la granulometría del árido.

Además, algunos organismos han utilizado cemento portland y cal como agentes para mejorar la adherencia. Generalmente, cuando la susceptibilidad a los daños pro-

vocados por el agua constituye un problema, el aditivo se añade a la mezcla con tres niveles y se realiza un ensayo de daños por agua para determinar la cantidad mínima de aditivo que se puede utilizar para incrementar la resistencia retenida hasta un nivel aceptable. Si puede obtenerse una mezcla aceptable, se preparan probetas Marshall o Hveem y se prueba la mezcla para comprobar si satisface los criterios de diseño.

9.10 Caracterización del hormigón asfáltico

Las pruebas para caracterizar el hormigón asfáltico son algo distintas de las que se usan para caracterizar otros materiales empleados en la ingeniería civil, como el acero, el hormigón de cemento portland y la madera. Una de las razones principales de esta diferencia es que el hormigón asfáltico es un material viscoelástico o viscoelastoplástico no lineal. Por tanto, su respuesta a la carga se ve enormemente afectada por la velocidad de carga y la temperatura. Asimismo, los pavimentos asfálticos se ven sometidos a cargas dinámicas aplicadas por el tráfico. También, los pavimentos asfálticos no suelen fallar a causa de un colapso súbito bajo el efecto de las cargas de los vehículos, sino a causa de la acumulación de una deformación permanente en el trayecto seguido por las ruedas (rodadas), por un agrietamiento provocado por la flexión repetida de la capa de hormigón asfáltico (agrietamiento por fatiga), por el agrietamiento térmico, por la excesiva rugosidad de la superficie del pavimento, por la migración del aglomerante asfáltico en la superficie del pavimento (sangrado), por la pérdida de flexibilidad del aglomerante asfáltico debido al envejecimiento y la oxidación (desmoronamiento), por la pérdida de la unión entre el aglomerante asfáltico y las partículas de árido debido a la humedad (stripping) o por otros factores. Por tanto, la mayoría de las pruebas utilizadas para caracterizar el hormigón asfáltico tratan de simular las condiciones reales de uso.

Se han empleado muchas pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades del hormigón asfáltico y para predecir su comportamiento a lo largo de su vida útil. Estas pruebas se realizan sobre probetas preparadas en el laboratorio o sobre testigos tomados del propio pavimento. Estos ensayos miden la respuesta del material a la carga, la deformación o condiciones medioambientales, como la temperatura, la humedad o los ciclos de congelación y descongelación. Algunas de estas pruebas están basadas en relaciones empíricas, mientras que otras permiten evaluar propiedades fundamentales. Todas las pruebas realizadas sobre el hormigón asfáltico se hacen a temperaturas de prueba y velocidades de carga cuidadosamente controladas, ya que la respuesta del asfalto se ve enormemente afectada por estos dos parámetros.

Las pruebas utilizadas para el diseño de mezclas Superpave, así como las pruebas de los métodos Marshall o Hveem explicadas anteriormente, se han venido utilizando para caracterizar las mezclas de hormigón asfáltico. También se emplean otros ensayos, algunos de los cuales están estandarizados por ASTM o AASHTO, mientras que otros se han usado principalmente en tareas de investigación. En las siguientes secciones se explican algunas de las pruebas más habituales.

9.10.1 Resistencia indirecta a la tracción

Cuando se aplican cargas de tráfico a la superficie del pavimento, se desarrolla una cierta fuerza de tracción en la parte inferior de la capa de hormigón asfáltico. Por tanto, es importante evaluar la resistencia a la tracción del hormigón asfáltico, con el fin de diseñar adecuadamente el espesor de la capa. En esta prueba, se suele utilizar una probeta cilíndrica de 102 mm (4 pulgadas) de diámetro y 64 mm (2,5 pulgadas) de altura, a la que se le aplica una carga vertical de compresión a lo largo del diámetro vertical mediante un dispositivo de carga similar al mostrado en la Figura 9.36. La carga se aplica mediante dos bandas de carga curvadas que se mueven con una velocidad de deformación de 51 mm/min. (2 pulgadas /min.). Los esfuerzos de tracción se desarrollan en la dirección horizontal y cuando estos esfuerzos alcanzan el valor de la resistencia a la tracción, la probeta sufre un fallo de tracción a lo largo del diámetro vertical. La prueba se realiza para una temperatura especificada. Con bandas de carga de 12,5 mm (0,5 pulgadas), la resistencia indirecta a la tracción se calcula como

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi t D} \tag{9.24}$$

donde

σ_t = resistencia a la tracción, MPa (psi)
P = carga de fractura, N (lb)
t = espesor de la probeta, mm (pulgadas)
D = diámetro de la probeta, mm (pulgadas)

9.10.2 Prueba diametral del determinación del módulo de resiliencia

Para evaluar la respuesta estructural del pavimento asfáltico, es necesario conocer el módulo del material de hormigón asfáltico. Dado que el hormigón asfáltico no es un material viscoelástico lineal, no es aplicable el módulo de elasticidad o módulo de Young. La prueba diametral de determinación del módulo de resiliencia (ASTM D4123) proporciona un módulo análogo, conocido como módulo de resiliencia. Para efectuar la prueba, se utiliza una probeta cilíndrica de 102 mm (4 pulgadas) de diámetro y 63,5 mm (2,5 pulgadas) de altura, a la que se le aplica una carga pulsante según el diámetro vertical utilizando un dispositivo de guía de la carga similar al mostrado en la Figura 9.36. La carga se aplica normalmente con una duración de 0,1 segundos y periodo de parada de 0,9 segundos. Después de unos cuantos centenares de repeticiones, se mide la deformación horizontal recuperable utilizando dos transductores diferenciales variables lineales (LVDT). La Figura 9.37 muestra sendas gráficas típicas que relacionan la carga y la deformación horizontal con el tiempo. Puesto que la prueba no es destructiva, esta se repite sobre la misma probeta después de girarla 90°. La prueba se realiza comúnmente a tres temperaturas: 5°C, 25°C y 40°C (41°F, 77°F y 104°F). El módulo de resiliencia de tracción diametral se calcula como

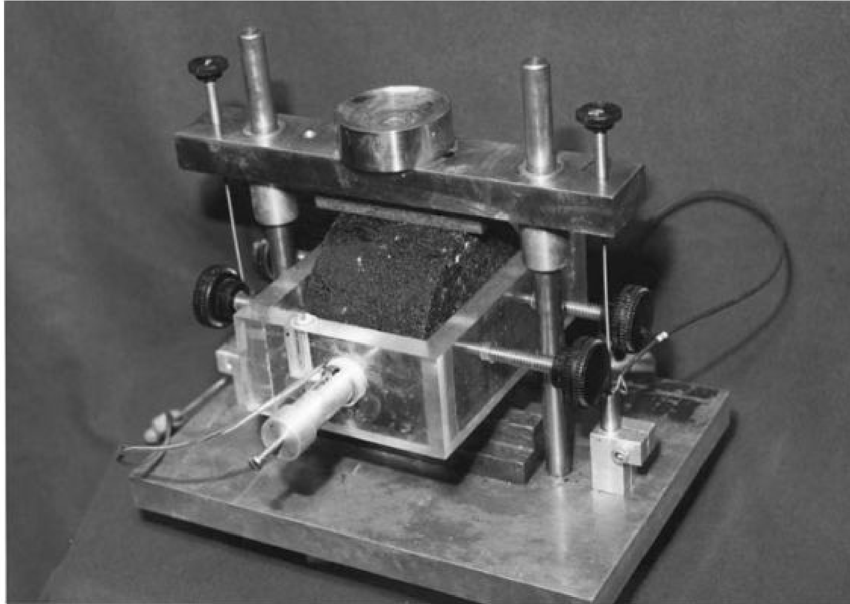


FIGURA 9.36 Carga diametral para ensayos de resistencia indirecta a la tracción y del módulo de resiliencia.

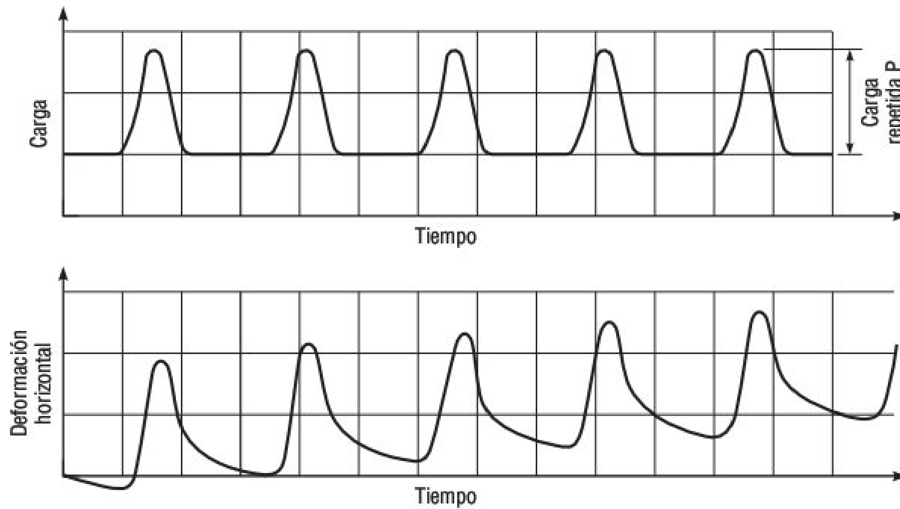


FIGURA 9.37 Funciones típicas de carga y de deformación horizontal en función del tiempo obtenidas a partir de las pruebas del módulo de resiliencia.

$$M_R = \frac{P(0{,}27 + v)}{t \cdot \Delta H} \tag{9.25}$$

donde

M_R = módulo de resiliencia directo de tracción, MPa (psi)
P = carga repetida, N (libras)
v = relación de Poisson, normalmente 0,3; 0,35 y 0,4 para temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C, respectivamente.
t = espesor de la probeta, mm (pulgadas)
ΔH = suma de las deformaciones horizontales recuperables en ambos lados de la probeta, mm (pulgadas)

Los valores típicos del módulo de resiliencia del hormigón asfáltico son de 6,89 GPa, 4,13 GPa y 1,38 GPa (1000 ksi, 600 ksi y 200 ksi) para temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C, respectivamente. La prueba diametral de determinación del módulo de resiliencia es muy sofisticada, porque mide deformaciones muy pequeñas. Por tanto, debe tenerse una gran precaución a la hora de alinear la probeta entre las bandas de carga y debe evitarse cualquier tipo de agitación. Asimismo, la magnitud de la carga debe ser lo suficientemente pequeña como para evitar la posibilidad de que se produzcan deformaciones permanentes en la probeta, y al mismo tiempo debe ser lo bastante larga como para obtener una deformación mensurable.

Problema de ejemplo 9.7

Se realiza la prueba del módulo de resiliencia en una probeta de hormigón asfáltico, obteniendo los siguientes datos:

Diámetro = 4,000 pulgadas
Espesor = 2,523 pulgadas
Carga repetida = 559 libras
Suma de deformaciones horizontales recuperables = 254×10^{-6} pulgadas

Suponiendo una relación de Poisson de 0,35, calcule el módulo de resiliencia.

Solución

$$M_R = \frac{P(0,27+v)}{t \cdot \Delta H} = 559 \times (0,27+0,35) / \left(2,523 \times 254 \times 10^{-6}\right)$$
$$= 541.000 \text{ psi}$$

9.10.3 Prueba de congelación y descongelación

La prueba de congelación y descongelación se realiza para evaluar el efecto de los ciclos de congelación y la descongelación sobre la rigidez del hormigón asfáltico. Para esta prueba, se emplean probetas cilíndricas de 102 mm (4 pulgadas) de diámetro y 64 mm (2,5 pulgadas) de altura. Tres de las probetas se prueban para determinar el módu-

lo de resiliencia como se ha explicado anteriormente, mientras que las otras tres probetas se someten a ciclos de congelación y descongelación, después de lo cual se determina el módulo de resiliencia. La relación de resistencia a la tracción se calcula dividiendo el valor promedio del módulo de resiliencia de las probetas acondicionadas entre el valor promedio del módulo de las probetas no acondicionadas, expresando la relación como un porcentaje. Normalmente, se requiere una relación mínima de resistencia a la tracción para identificar las mezclas que no se ven severamente afectadas por los ciclos de congelación y descongelación.

9.10.4 Uso de modelos reológicos para analizar la respuesta dependiente del tiempo

El hormigón asfáltico es un material viscoelástico que tiene una respuesta a la carga que varía en función del tiempo. Para analizar la respuesta de los materiales dependientes del tiempo se han venido utilizando modelos reológicos compuestos de combinaciones de elementos de Hooke (muelle) y de Newton (amortiguador), como se ha explicado en el Capítulo 1. El modelo de Burgers ilustrado en la Figura 1.12 permite aproximar bastante las respuestas asfálticas (Mamlouk, 1984). Para obtener los parámetros del modelo de Burgers se utilizan pruebas de laboratorio, como la prueba de reptación, seguida de un procedimiento de ajuste de curvas. Una vez determinados estos parámetros puede utilizarse un modelo para predecir la respuesta del material en diferentes condiciones de carga. Por ejemplo, el modelo de Burgers se ha empleado para predecir la aparición de rodadas en pavimentos de hormigón asfáltico bajo la acción de cargas de tráfico.

9.11 Producción de hormigón asfáltico

El hormigón asfáltico se produce en una planta dosificadora con una planta de fabricación continua o de tambor (Instituto del asfalto, 1989). En Estados Unidos, antiguamente se empleaban de forma generalizada las plantas dosificadoras; sin embargo, ahora se prefieren las plantas de fabricación continua que son más eficientes en términos energéticos.

En las plantas de fabricación continua (Figura 9.38), los áridos de diferentes granulometrías se colocan en contenedores fríos. Las proporciones granulométricas necesarias se toman de esos contenedores mediante una cinta transportadora. Los áridos se transfieren entonces a la primera parte del tambor donde se secan y calientan. El cemento asfáltico caliente se introduce en el último tercio del tambor, después de lo cual los áridos y el asfalto se mezclan. Puesto que el hormigón asfáltico se produce de manera continua en este tipo de plantas, se transfiere a un silo de almacenamiento hasta el instante de poder cargarlo en un camión y transportarlo hasta la obra.

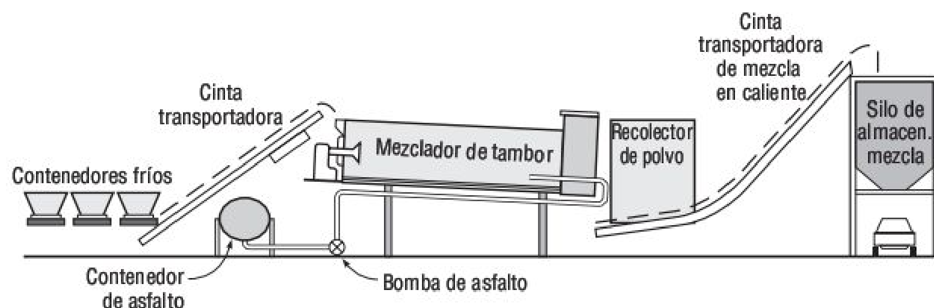




FIGURA 9.38 Planta continua o de tambor de hormigón asfáltico.

9.12 Reciclado del hormigón asfáltico

El reciclado de materiales de pavimentos tiene una larga historia. Sin embargo, las tareas de reciclado cobraron una mayor importancia a mediados de la década de 1970, después del embargo del petróleo, a causa del incremento de los precios del asfalto. En un intento de utilizar de manera eficiente los recursos disponibles, surgió la necesidad de reutilizar los materiales de pavimento antiguos (Instituto del asfalto, 1989). Aunque el pavimento pudiera estar bastante deteriorado, los materiales antiguos de hormigón asfáltico se podían reutilizar sin problemas en nuevos pavimentos. Actualmente, el re-

ciclado de los materiales antiguos de pavimentos se está convirtiendo en una práctica normal, ya que ofrece las siguientes ventajas:

1. Un ahorro de aproximadamente el 25% del coste de los materiales.
2. Ahorro energético en la fabricación y transporte de los materiales en bruto.
3. Menos impacto medioambiental, al reducir la cantidad de nuevos materiales requeridos y al eliminar la necesidad de deshacerse de los antiguos materiales.
4. Se elimina el problema de reconstruir las estructuras, bordillos y cunetas de las obras públicas, problema que está asociado con la colocación de capas superpuestas de pavimento.
5. Se reduce el peso propio de los puentes, al eliminarse las capas superpuestas de pavimento.
6. Se mantiene la altura de los túneles, al eliminarse las capas superpuestas de pavimento.

El reciclado puede clasificarse en tres tipos distintos: *reciclado de superficie*, *reciclado en la planta central* y *reciclado a pie de obra*.

9.12.1 Reciclado de superficie

El reciclado de superficie se define como la reconstrucción de los 25 mm (1 pulgada) superiores de la superficie del pavimento utilizando un calefactor–escarificador. La máquina calefactora aplanadora calienta la superficie del pavimento, lo que permite reparar las grietas y rugosidades de menor tamaño. Normalmente, se añade un agente rejuvenecedor después del calentamiento, seguido de un ligero rascado de la superficie y de una compactación.

9.12.2 Reciclado en la planta central

El reciclado en la planta central se lleva a cabo moliendo el antiguo pavimento (Figura 9.39) y enviando el pavimento asfáltico así recolectado a una planta central de fabricación de hormigón asfáltico, donde se mezcla con algún tipo de agente rejuvenecedor o asfalto blando y áridos para fabricar hormigón asfáltico de mezcla en caliente. Si los materiales reciclados se mezclan con los áridos en una planta de hormigón asfáltico convencional, entran en combustión y generan humo, lo que provoca grandes problemas medioambientales. En consecuencia, los materiales reciclados se añaden a la mezcladora en la planta de dosificación o se añaden a la mitad del recorrido del tambor en una planta de fabricación continua. La cantidad de materiales reciclados varía entre el 20% y el 70%. La granulometría de los nuevos áridos se selecciona para corregir las deficiencias granulométricas que puedan tener los áridos reciclados. Normalmente, el grado del nuevo cemento asfáltico es blando para que, cuando se mezcle con el antiguo, que es un asfalto duro, se obtenga una consistencia apropiada. El diseño de mezclas de hormigón asfáltico, en el que se incluyan materiales reciclados, se realiza normalmente aplicando el método Marshall o Hveem.



FIGURA 9.39 Molido de un pavimento antiguo.

Además del reciclado en una planta de fabricación de mezcla en caliente, también pueden reciclarse los materiales en una planta de fabricación en frío, utilizando nuevo asfalto emulsionado o fluidificado. Sin embargo, el método en frío no permite obtener la calidad del material de mezcla en caliente.

9.12.3 Reciclado a pie de obra

El reciclado a pie de obra se lleva a cabo rascando y pulverizando la superficie del antiguo pavimento y añadiendo áridos nuevos, agua y emulsión de asfalto. Los materiales nuevos y antiguos se mezclan en la propia obra, se corrigen granulométricamente y se compactan. A continuación, se deja que la superficie cure y luego se emplea como capa superficial para carreteras de bajo volumen de tráfico. La capa reciclada también puede emplearse como base estabilizada, en cuyo caso se cubre con una superficie de hormigón asfáltico.

9.13 Aditivos

Se utilizan muchos tipos de aditivos (modificadores) para mejorar las propiedades del asfalto o para añadir propiedades especiales a las mezclas de hormigón asfáltico (Roberts *et al.*, 1996). Normalmente, se realiza una prueba de laboratorio y se observa el comportamiento sobre el terreno, para evaluar el efecto de los aditivos y justificar su coste. Es preciso evaluar cuidadosamente el efecto de la adición de aditivos, en caso contrario podrían producirse fallos prematuros en el pavimento. En la actualidad, todavía se sigue evaluando la reciclabilidad de las mezclas asfálticas modificadas.

9.13.1 Rellenos

Al hormigón asfáltico se le pueden añadir muchos tipos de rellenos, como áridos finos triturados, cemento portland, cal, ceniza volante y negro de humo. Los rellenos se utilizan para satisfacer los requisitos granulométricos de los materiales que pasan por el cedazo de 0,075 mm (Nº 200), incrementar la estabilidad, mejorar la unión entre los áridos y el asfalto, o para rellenar los huecos y reducir así la cantidad de asfalto requerida.

9.13.2 Extendedores

Los extendedores, como el azufre y la lignina, se utilizan para reducir la cantidad de asfalto necesario, disminuyendo de esta manera los costes.

9.13.3 Caucho

El caucho se ha venido utilizando en las mezclas de hormigón asfáltico en forma de caucho natural, estireno–butadieno (SBR), estireno–butadieno–estireno (SBS), o ruedas de automóviles recicladas. El caucho aumenta la elasticidad y la rigidez de la mezcla e incrementa también el grado de unión entre el asfalto y los áridos. Las ruedas de automóviles recicladas pueden añadirse al cemento asfáltico (método húmedo) o agregarse en forma de caucho desmenuzado a los áridos (método seco).

9.13.4 Plásticos

Los plásticos se han venido usando para mejorar ciertas propiedades del asfalto. Entre los plásticos usados con este propósito podemos citar el polietileno, el polipropileno, el etil–vinilo–acetato (EVA) y el cloruro de polivinilo (PVC). Los plásticos incrementan la rigidez de la mezcla, reduciendo así el potencial de aparición de rodadas. Los plásticos también pueden reducir la susceptibilidad térmica del asfalto y mejorar su comportamiento a bajas temperaturas.

9.13.5 Agentes para mejorar la adhesividad

Los agentes que permiten mejorar la adhesividad se utilizan para favorecer la unión entre el cemento asfáltico y los áridos, especialmente en las mezclas susceptibles de sufrir daños debidos al agua. El agente más comúnmente utilizado con este propósito es la cal, que puede añadirse como relleno o en forma de lechada y puede mezclarse con los áridos. El cemento portland puede emplearse como alternativa a la cal.

9.13.6 Otros

Se han utilizado otros aditivos como fibras, oxidantes e hidrocarburos para modificar ciertas propiedades del asfalto, como la resistencia a la tracción y la rigidez.

RESUMEN

El asfalto producido a partir de petróleo crudo es uno de los principales materiales en la construcción de carreteras. El ingeniero civil está directamente implicado en la especificación y establecimiento de requisitos, tanto para el aglomerante de cemento asfáltico como para las mezclas de hormigón asfáltico. Existen diversos métodos de clasificación de los cementos asfálticos. La tendencia actual es la de utilizar el método de gradación según el comportamiento (PG) utilizado en el proceso de diseño Superpave desarrollado en el programa SHRP. Este método de clasificación establece un enlace directo entre las propiedades del aglomerante y los parámetros que describen el comportamiento del pavimento. De forma similar, el método de mezclas Superpave utiliza pruebas de comportamiento para evaluar las características de las mezclas relativas al comportamiento esperado en servicio. Cabe suponer que este método continuará siendo mejorado por los distintos organismos reguladores en el futuro. Con el soporte de la Administración Federal de Autopistas de Estados Unidos, se está desarrollado un esfuerzo concertado de sustitución de los métodos tradicionales Marshall y Hveem para el diseño de mezclas por los nuevos procedimientos Superpave.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

9.1 ¿Cuál es la diferencia entre alquitrán y cemento asfáltico?

9.2 Explique los principales usos del asfalto.

9.3 Defina qué quiere decir el concepto de susceptibilidad térmica del asfalto. Explique su efecto sobre el comportamiento de los pavimentos de hormigón asfáltico. ¿Dónde se utilizan los asfaltos blandos, en climas cálidos o fríos?

9.4 La temperatura tiene una gran influencia sobre la viscosidad del asfalto. Dibuje en una gráfica la relación entre la viscosidad del asfalto (logarítmica) y la temperatura, para dos casos distintos: (a) un asfalto de baja susceptibilidad térmica y (b) un asfalto de alta susceptibilidad térmica. Etiquete todos los ejes y relaciones.

9.5 Explique brevemente la composición química del asfalto.

9.6 Indique cuál es la importancia de cada uno de estos ensayos:

a. Prueba del punto de inflamabilidad.
b. Procedimiento RTFO.
c. Prueba del viscosímetro rotacional.
d. Prueba de reómetro de cortante dinámica.
e. Prueba de penetración.

9.7 Explique el envejecimiento que tiene lugar en el cemento asfáltico durante la mezcla con los áridos y a lo largo de su vida útil. ¿Cómo pueden simularse en el laboratorio los distintos tipos de envejecimiento del cemento asfáltico?

9.8 Indique cómo se utilizan los diversos ensayos Superpave para caracterizar el aglomerante asfáltico y cómo se relacionan esos ensayos con el comportamiento del pavimento.

9.9 Defina los cuatro métodos existentes de clasificación de los aglomerantes asfálticos. ¿Qué método se emplea en su país?

9.10 Para seleccionar un aglomerante asfáltico para un determinado lugar, se estima que el valor medio a lo largo de siete días de la temperatura máxima del pavimento es de 61°C con una desviación estándar de 1,5°C. El valor medio de la temperatura mínima del pavimento es de −8°C con una desviación estándar de 3,2°C. ¿Qué grado de asfalto (PG) es necesario para una fiabilidad del 98%?

9.11 Como ingeniero de materiales que trabaja para una empresa de construcción de autopistas, ¿qué grado PG estándar de aglomerante asfáltico especificaría para cada una de las condiciones mostradas en la Tabla P9.11? (indique todos los cálculos y complete la tabla).

Tabla P9.11

	Temp. máxima del pavimento 7 días, °C		Temp. mínima del pavimento, °C		Grado PG recomendado	
Caso	Media, °C	Dev. Est., °C	Media, °C	Dev. Est., °C	Fiabilidad 50%	Fiabilidad 98%
1	46	1,5	−34	2		
2	56	2	−15	2,5		
3	66	2	8	1,5		

9.12 Para las siguientes condiciones de temperatura, calcule el grado Superpave apropiado para fiabilidades del 50% y del 98% (indique los cálculos realizados).

Temperatura máxima del pavimento a lo largo de siete días igual a 46°C con una desviación estándar de 2°C.

Temperatura mínima del pavimento igual a 19°C con una desviación estándar de 4°C.

9.13 ¿Cuáles son las diferencias entre las emulsiones CRS-2 y SS-1?

9.14 Explique cómo funcionan las emulsiones asfálticas como aglomerante en las mezclas asfálticas.

9.15 ¿Cuáles son los componentes del asfalto de mezcla en caliente? ¿Cuál es la función de cada componente de la mezcla?

9.16 ¿Cuáles son los objetivos del proceso de diseño de mezclas de hormigón asfáltico?

9.17 ¿Por qué es importante tener un contenido de aglomerante óptimo en el asfalto de mezcla en caliente? ¿Qué pasaría si se utiliza un contenido de aglomerante inferior al óptimo? ¿Qué sucedería si se emplea un contenido superior al valor óptimo? ¿Cuál es el rango típico de contenido de aglomerante en el asfalto de mezcla en caliente?

9.18 Explique por qué la resistencia del hormigón asfáltico no es necesariamente la propiedad más importante de dicho material.

9.19 Una probeta de hormigón asfáltico tiene una masa en el aire de 1.249,3 g, una masa en el agua de 735,8 g y una masa en estado SSD de 1.250,2 g. Calcule la gravedad específica en seco de la probeta.

9.20 Como parte del diseño de una mezcla, se pesa una probeta de asfalto cilíndrica compactada en el laboratorio, con el fin de determinar la gravedad específica en seco. Se obtienen los siguientes resultados:

Masa seca en aire = 1.204,5 gramos
Masa sumergida en agua = 689,4 gramos
Masa en estado SSD = 1.211,3 gramos

a. ¿Cuál es la gravedad específica en seco de la probeta compactada (G_{mb})?
b. Si la gravedad específica máxima teórica de la probeta (G_{mm}) es 2,531. ¿Cuál será el contenido de huecos de aire de la probeta, en porcentaje?

9.21 Para el hormigón asfáltico, defina
a. Huecos de aire.
b. Huecos en el árido mineral.
c. Huecos rellenos de asfalto.

9.22 Una mezcla de árido está compuesta por un 53% de árido grueso en peso (gravedad específica = 2,702), un 43% de árido fino (gravedad específica = 2,621) y un 4% de relleno (gravedad específica = 2,779). La probeta compactada contiene un 6% de aglomerante asfáltico (gravedad específica = 1,052) en peso sobre la mezcla total y una densidad en seco de 145,2 libras/pie^3. Ignorando la absorción, calcule el porcentaje de huecos totales en la mezcla, el porcentaje de huecos en el árido mineral y el porcentaje de huecos rellenos de asfalto.

9.23 Una mezcla de hormigón asfáltico contiene un 94% de áridos en peso. Las gravedades específicas del árido y del asfalto son 2,7 y 1,0, respectivamente. Si la densidad en seco de la mezcla es de 145 libras/pie^3, ¿Cuál es el porcentaje de huecos total en la mezcla?

9.24 Después de dos años de soportar tráfico, se toman una serie de testigos en una carretera que presenta grandes signos de sangrado y de rodadas. Se miden la gravedad específica en seco y la gravedad específica máxima teórica en estos testigos, obteniendo los siguientes resultados:

Gravedad específica en seco = 2,498
Gravedad específica máxima teórica = 2,545

a. Calcule los huecos de aire.

b. Si el contenido especificado de huecos de aire era del 4% en el diseño, explique qué efecto han tenido los huecos de aire calculados sobre las rodadas y el sangrado observados en la carretera.

9.25 Una probeta de hormigón asfáltico tiene las siguientes propiedades:

Contenido de asfalto = 5,3 % por peso total de mezcla
Gravedad específica en seco de la mezcla = 2,442
Gravedad específica máxima teórica = 2,535
Gravedad específica en seco del árido = 2,703

Calcule los porcentajes de VTM, VMA y VFA.

9.26 Describa brevemente el procedimiento volumétrico de diseño de mezclas de Superpave.

9.27 Basándose en los datos mostrados en la Tabla P9.27, seleccione la mezcla para una estructura de áridos de un diseño Superpave.

Tabla P9.27

	Mezcla		
Datos	**1**	**2**	**3**
G_{mb}	2,451	2,465	2,467
G_{mm}	2,585	2,654	2,584
G_b	1,030	1,030	1,030
P_b	5,9	5,5	5,8
P_s	94,1	94,5	94,2
P_d	4,5	4,5	4,5
G_{sb}	2,657	2,667	2,705
H_{ini}	127	135	124
H_{des}	113	114	118

9.28 Basándose en los datos de la Tabla P9.28, determine el contenido de aglomerante para una mezcla Superpave si la carga de tráfico es de 15 millones ESAL.

Tabla P9.28

	Contenido de aglomerante (%)			
Datos	**5,5**	**6,0**	**6,5**	**7,0**
G_{mb}	2,351	2,441	2,455	2,469
G_{mm}	2,579	2,558	2,538	2,518
G_b	1,025	1,025	1,025	1,025
P_s	94,5	94,0	93,5	93,0
P_d	4,5	4,5	4,5	4,5
G_{sb}	2,705	2,705	2,705	2,705
h_{ini}	129	131	131	128
h_{des}	112	113	116	115

9.29 Dados los datos de la Tabla P9.29, seleccione la mezcla y el contenido de aglomerante para una estructura de áridos de un diseño Superpave, cuya carga de tráfico es de cinco millones ESAL.

Tabla P9.29

	Mezcla		
Datos	**1**	**2**	**3**
G_{mb}	2,457	2,441	2,477
G_{mm}	2,598	2,558	2,664
G_b	1,025	1,025	1,025
P_b	5,9	5,7	6,2
P_s	94,1	94,3	93,8
P_d	4,5	4,5	4,5
G_{sb}	2,692	2,688	2,665
H_{ini}	125	131	125
H_{des}	115	118	115

	Contenido de aglomerante (%)			
Datos	**5,4**	**5,9**	**6,4**	**6,9**
G_{mb}	2,351	2,441	2,455	2,469
G_{mm}	2,570	2,558	2,530	2,510
G_b	1,025	1,025	1,025	1,025
P_s	94,6	94,1	93,6	93,1
P_d	4,5	4,5	4,5	4,5
G_{sb}	2,688	2,688	2,688	2,688
h_{ini}	125	131	126	130
h_{des}	115	118	114	112

9.30 El método Marshall para el diseño de mezclas ha sido empleado por muchas empresas de construcción de carreteras.

a. ¿Cuáles son los pasos de los que consta el método Marshall para el diseño de mezclas?

b. ¿Qué parámetros se calculan?

c. Muestre las gráficas típicas que se dibujan después de completar las pruebas.

d. ¿Cuál es el objetivo de dibujar estas gráficas?

9.31 Hay que diseñar una mezcla hormigón asfáltico de acuerdo con el método Marshall. Se utiliza un cemento asfáltico AC-20 con una gravedad específica de 1,00. Asimismo, hay que emplear una mezcla de áridos densa con un tamaño máximo de 19 mm y una gravedad específica en seco de 2,696. La gravedad específica máxima teórica de la mezcla es igual a 2,470. Se realizan una serie de

mezclas de prueba obteniéndose los resultados promedio mostrados en la Tabla P9.31. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje las gráficas apropiadas necesarias para el método Marshall y seleccione el contenido de asfalto óptimo aplicando los criterios de diseño del Instituto del asfalto para un volumen medio de tráfico. Asuma un contenido de huecos de aire del 4% cuando utilice la Tabla 9.14.

Tabla P9.31

Contenido de asfalto, % en peso	Gravedad específica en seco	Estabilidad, N	Flujo, 0,25 mm
4,0	2,303	7076	9
4,5	2,386	8411	10
5,0	2,412	7565	12
5,5	2,419	5963	15
6,0	2,421	4183	22

9.32 Tiene que diseñarse una mezcla de hormigón asfáltico siguiendo el procedimiento Marshall. Se emplea un cemento asfáltico AC-30 con una gravedad específica (G_b) de 1,00 y una mezcla de áridos densa con un tamaño máximo de árido de 3/4 de pulgada y una gravedad específica en seco (G_{sb}) de 2,786. La gravedad específica máxima teórica de la mezcla (G_{mm}), para un contenido de asfalto del 5,0%, es de 2,490. Se realizan una serie de mezclas de prueba obteniéndose los resultados promedio mostrados en la Tabla P9.32. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje las seis gráficas necesarias para el método Marshall y seleccione el contenido óptimo de asfalto, aplicando los criterios de diseño del Instituto del asfalto para un volumen medio de tráfico (véase la Tabla 9.13). Asuma un contenido de huecos de aire del 4% cuando utilice la Tabla 9.14.

Tabla P9.32

Contenido de asfalto (P_b) (% en peso)	Gravedad específica en seco (G_{mb})	Estabilidad, lb	Flujo, 0,01 pulg.
3,50	2,294	1600	8
4,00	2,396	1980	9
4,50	2,421	2130	11
5,00	2,416	1600	14
5,50	2,401	1280	20

9.33 Se utiliza el método Marshall para diseñar una mezcla de hormigón asfáltico para una carretera con un alto volumen de tráfico. Se emplea cemento asfáltico con una gravedad específica de 1,025 y la mezcla contiene un árido con un tamaño máximo nominal de partículas de 19 mm y una gravedad específica en seco de 2,654. La gravedad específica máxima teórica de la mezcla es igual a 2,480 para un con-

tenido de asfalto del 4,5%. Se realizan una serie de mezclas de prueba obteniéndose los resultados promedio mostrados en la Tabla P9.33. Determine el contenido óptimo de asfalto aplicando los criterios de diseño del Instituto del asfalto. Asuma un contenido de huecos de aire del 4% cuando utilice la Tabla 9.14.

Tabla P9.33

Contenido de asfalto (% en peso)	Gravedad específica en seco	Estabilidad, kN	Flujo, 0,25 mm
3,5	2,367	8,2	7,3
4,0	2,371	8,6	9,4
4,5	2,389	7,5	11,5
5,0	2,410	7,2	12,5
5,5	2,422	6,9	13,2

9.34 Describa el proceso de determinación del potencial de separación del árido y del asfalto (*stripping*) en una mezcla de hormigón asfáltico.

9.35 Explique brevemente cómo se determina en el laboratorio el módulo de resiliencia indirecta a la tracción.

9.36 Se realiza la prueba del módulo de resiliencia sobre una probeta de hormigón asfáltico, obteniéndose los siguientes datos:

Diámetro = 4,029 pulgadas
Altura = 2,497 pulgadas
Carga repetida = 559 libras
Suma de deformaciones horizontales recuperables = 254×10^{-6} pulgadas

Suponiendo una relación de Poisson de 0,35, calcule el módulo de resiliencia.

9.37 Indique seis ventajas de reciclar los materiales de los pavimentos asfálticos. ¿Por qué no se pueden mezclar los materiales reciclados con los áridos en una planta convencional de fabricación de hormigón asfáltico de mezcla en caliente? Indique las formas apropiadas de reciclar los materiales recuperados en los dos tipos existentes de plantas de fabricación de asfalto en caliente.

9.38 Enumere cuatro modificadores del asfalto distintos que puedan añadirse al asfalto y a las mezclas asfálticas, y señale cuál es el efecto de cada uno de ellos.

9.39 ¿Cuándo se utiliza cemento portland en el hormigón asfáltico?

9.40 Durante la construcción de la capa de asfalto en caliente de un pavimento asfáltico se toman testigos en lugares aleatorios después de la compactación, para detectar cualquier posible problema de construcción y para garantizar que se encuentra dentro de los límites especificados. El valor objetivo especificado es de 148,2 libra/pie^3 y los límites superior e inferior de la especificación son 148,9 libra/pie^3 y 147,5 libra/pie^3, respectivamente. Las pruebas permiten obtener los datos de densidad proporcionados en la Tabla P9.40.

Tabla P9.40

Testigo nº.	Densidad (lb/pie^3)	Testigo nº	Densidad (lb/pie^3)
1	148,3	11	147,8
2	147,8	12	148,1
3	148,2	13	147,3
4	148,7	14	147,7
5	148,2	15	147,3
6	147,7	16	147,0
7	148,4	17	147,1
8	147,8	18	146,7
9	147,7	19	146,9
10	148,6	20	146,8

a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, cree un diagrama de control para estos datos en el que se muestren el valor objetivo y los límites superior e inferior de la especificación. ¿Se encuentran los datos de densidad dentro los límites de la especificación?
b. Comente cualquier tendencia que observe y las posibles razones.

9.14 Referencias

The Asphalt Institute. *The Asphalt Handbook*. MS-4. Lexington, KY: The Asphalt Institute, 1989.

The Asphalt Institute. *Introduction to Asphalt*. MS-5. Lexington, KY: The Asphalt Institute, 1993.

The Asphalt Institute. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*. MS-2. Lexington, KY: The Asphalt Institute, 1995.

Goetz, W. H. y L. E. Wood. “Bituminous Materials and Mixtures”. *Highway Engineering Handbook,* Section 18. Nueva York: McGraw-Hill, 1960.

Huang, Y.H. *Pavement Analysis and Design*. Segunda edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.

Jansich, D.W. y F.S. Gaillard. *Minnesota Seal Coat Handbook*. Maplewood, MN: Department of Transportation, 1998.

Mamlouk, M.S. “Rheology of Cold-Recycled Pavement Materials Using Creep Test”. *Journal of Testing and Evaluation* 12(6): 341-347, 1984.

Mamlouk, M.S. y J.P. Zaniewski. *Pavement Preventive Maintenance: Description, Effectiveness, and Treatments*. Special Technical Publication 1348. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1998.

McGennis, R. B. *et al. Background of Superpave Asphalt Blinder Test Methods.* Publicación nº FHWA-SA-94-069. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1994.

McGennis, R. B. *et al. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis.* Publicación nº FHWA-SA-95-003. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1995.

Peterson, J. C. *Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability—State of the Art.* Transportation Research Record Nº 999. Washington, DC: Transportation Research Board, 1984.

Roberts, F. L., P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Y. Lee y T. W. Kennedy. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.* Segunda Edición. Lanham, MD: NAPA Education Foundation, 1996.

Witczak, M.W., K. Kaloush, T. Pellinen, M. El-Basyouny y H. Von Quintus. *Simple Performance Test for Superpave Mix Design.* NCHRP Report 465. Washington, D.C: National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, 2002.

10

MADERA

La madera, debido a su disponibilidad, su coste relativamente bajo, su facilidad de uso y su durabilidad, si se la mantiene adecuadamente, continúa siendo un material importante en el campo de la ingeniería civil. La madera se utiliza ampliamente en edificios, puentes, obras públicas, suelos, techos, armazones y soportales (véanse las Figuras 10.1 y 10.2). En las aplicaciones de ingeniería civil se emplea la madera natural y productos de madera manufacturados, como tableros de madera laminada, contrachapados y tableros de aglomerado. Para poder usar la madera de forma eficiente, es importante conocer sus propiedades básicas y sus limitaciones. En Estados Unidos, el Servicio de Bosques del Departamento de Agricultura (*Forest Service of the Department of Agriculture*) tiene una amplia responsabilidad de gestión en la recolección de madera en los terrenos públicos, así como en la asistencia a organismos privados a la hora de seleccionar productos de silvicultura. Este departamento gubernamental ha elaborado un excelente documento en el que se describen las características y propiedades de la madera (USDA-FS, 1999).

Este capítulo se ocupa de las propiedades y características de la madera. Al diseñar una estructura de madera, las juntas y conexiones limitan en muchas ocasiones los elementos de diseño que pueden utilizarse. Pero el tema de las juntas suele cubrirse en las clases de diseño para construcción en madera, por tanto, en este texto, no se aborda dicho tema.

La madera es un producto natural y renovable que se obtiene de los árboles. Desde el punto de vista biológico, un árbol es una planta leñosa capaz de alcanzar una altura de al menos 6 m (20 pies), que normalmente tiene un único tronco autosoportado, carece de ramas en los 1,5 m (4 pies) situados por encima del suelo y tiene una copa bien definida. En Estados Unidos, existen más de 600 especies de árboles.

Los árboles se clasifican como endógenos o exógenos, según su tipo de crecimiento. Los árboles endógenos, como el bambú, crecen con fibras entrelazadas. La madera de este tipo de árbol no suele utilizarse en aplicaciones de ingeniería dentro del mundo occidental. Los árboles exógenos, por su parte, crecen desde el centro hacia afuera mediante la adición de capas concéntricas de madera alrededor del núcleo central. En este libro solo vamos a considerar los árboles exógenos.



FIGURA 10.1 Armazón de madera utilizado para soporte estructural de un edificio.



FIGURA 10.2 Montaña rusa de madera.

Los árboles se clasifican en sentido amplio en caducifolios y coníferas. En general, la madera de conífera es más blanda, menos densa y más fácil de cortar que la de los ár-

boles caducifolios o frondosos. Sin embargo, existen excepciones como la madera de balsa, una madera enormemente blanda y ligera.

Generalmente, los árboles caducifolios pierden sus hojas al final de cada estación de crecimiento. En Estados Unidos, la producción comercial de madera de frondosas proviene de 40 especies de árboles distintas. La madera de frondosas suele emplearse para muebles y revestimientos decorativos, debido al agradable patrón de sus vetas. El coste de las frondosas limita sus aplicaciones en el terreno de la construcción.

Las coníferas, también denominadas perennes, tienen hojas ahusadas y normalmente no las pierden al final de la estación de crecimiento. Las coníferas crecen de manera continua a través de la copa, lo que da lugar a un tronco uniforme y a unas características homogéneas (Panshin y De Zeeuw, 1980). La producción de la madera de coníferas en Estados Unidos procede de unas 20 especies individuales de coníferas, y su madera se emplea ampliamente en el campo de la construcción. Las coníferas crecen en grandes bosques, lo que permite obtener la madera de forma económica. Maduran rápidamente, lo que las convierte en un recurso renovable. La Tabla 10.1 muestra ejemplos de especies de coníferas y frondosas de Estados Unidos (USDA-FS, 1999).

10.1 Estructura de la madera

La madera tiene una estructura distintiva que afecta a su uso como material de construcción. Los ingenieros civiles y de la construcción deben comprender la forma en que crece el árbol y la naturaleza anisotrópica de la madera, con el fin de poder diseñar y construir adecuadamente estructuras de madera.

10.1.1 Anillos de crecimiento

Las capas concéntricas del tronco de los árboles exógenos se denominan *anillos anuales*, como se muestra en la Figura 10.3a. La madera producida en una estación de crecimiento forma un único anillo de crecimiento. Cada anillo anual está compuesto de madera temprana, que se produce por el rápido crecimiento experimentado durante la primavera, y de madera tardía, que corresponde al crecimiento que tiene lugar durante el verano. La madera tardía está compuesta por células densas, oscuras y de paredes gruesas, produciendo así una estructura más fuerte que la de la madera temprana, como se muestra en la Figura 10.3b. Las partes predominantes del tronco del árbol incluyen la *corteza*, el *cambium*, la *madera* y la *médula*, como se ilustra en la Figura 10.4. La corteza es la cubierta exterior del árbol y tiene una capa externa y otra interna. La capa externa está muerta y tiene un aspecto suberoso, así como una gran variabilidad de espesor, dependiendo de la especie y de la edad del árbol. La capa interna de la corteza es la capa de crecimiento de la misma, pero no forma parte de la madera del árbol. El cambium es una fina capa de células situada entre la madera y la corteza y es ahí donde tiene lugar todo el crecimiento de la madera.

TABLA 10.1 Principales especies de coníferas y frondosas de Estados Unidos.

Frondosas	Coníferas
Abedul	Abeto balsámico
Abedul de papel	Abeto de Douglas
Acacia de tres púas	Abeto de Fraser
Álamo	Alerce americano
Álamo temblón	Alerce americano occidental
Aliso	Cedro blanco americano
Almez americano	Cedro de incienso
Árbol del ámbar	Ciprés calvo
Arce de Oregón	Ciprés de Lawson
Arce rojo	Ciprés de Nootka
Arce sacarino	Coral africano
Castaño americano*	Picea de las montañas
Castaño de Indias	Picea de Sitka
Cerezo negro	Picea roja
Chopo	Pino de Banks
Chopo de Virginia	Pino de Elliot
Fresno blanco	Pino de Lord Weymouth
Fresno de Oregón	Pino lambertiana
Haya americana	Pino monticola
Magnolia	Pino ponderosa
Nogal americano	Pino torcido
Nogal ceniciento	Sabina de Virginia
Nogalillo	Tsuga del Canadá
Olmo	Tsuga del Pacífico
Roble americano	Tuya del Canadá
Roble blanco	Tuya gigante
Roble curtiente	
Roble negro	
Robinia pseudoacacia	
Sasafrás	
Sauce negro	
Sicomoro	
Tilo americano	
Tupelo	

*Ya no se talan estos árboles, pero hay disponibles maderas recicladas de los mismos.

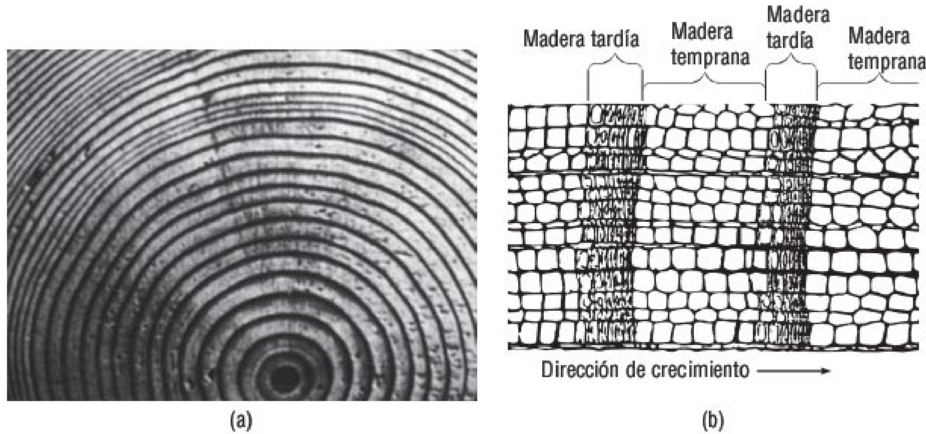


FIGURA 10.3 Sección transversal de un tronco de árbol típico: (a) anillos anuales (fotografía cortesía de American Forest & Paper Association, Washington, D.C.) y (b) madera temprana y madera tardía.

La sección de la madera del árbol está compuesta por la *albura* y el *duramen*. La albura funciona como almacén para los almidones y como conducto para el transporte de la savia. Generalmente, las especies con un crecimiento más rápido tienen una albura más gruesa. En su estado natural, la albura no resiste mucho cuando se la expone a condiciones que favorecen la descomposición. El duramen no es una parte viva del árbol. Está compuesto por células que se han visto alteradas física y químicamente por depósitos minerales. El duramen proporciona la resistencia estructural del árbol. Puesto que el duramen no contiene savia, resiste de manera natural a la descomposición.

La médula es el núcleo central del árbol. Su tamaño varía en las distintas especies, pudiéndose ser prácticamente indistinguible o tener un gran tamaño y ser perfectamente aparente. El color va de negro a blanquecino, dependiendo de la especie de árbol y de la región en la que se halle. La estructura de la médula puede ser sólida, porosa, con cámaras o hueca.

10.1.2 Naturaleza anisotrópica de la madera

La madera es un material anisotrópico, en el sentido de que tiene propiedades y características diferentes en cada dirección. Las tres orientaciones de eje en la madera son la longitudinal, o paralela a la veta, la radial, o perpendicular a los anillos de crecimiento; y la tangencial o tangente a los anillos de crecimiento, como se ilustra en la Figura 10.4. La naturaleza anisotrópica de la madera afecta a sus propiedades físicas y mecánicas, como la contracción, la rigidez y la resistencia.

El comportamiento anisotrópico de la madera es el resultado de la geometría tubular de las células de la madera. Estas células presentan una sección transversal rectangular. Los centros de los tubos son huecos, mientras que los extremos son ahusados. La relación longitud-anchura puede tener un valor alto, hasta de 100. La dimensión más larga de la mayoría de las células es paralela al tronco del árbol. Sin embargo, unas

pocas células, en haces localizados, crecen radialmente desde el centro hacia el exterior del árbol. La orientación preponderante de las células en una dirección proporciona a la madera sus características anisotrópicas. La estructura de tubos huecos es muy eficiente a la hora de resistir esfuerzos de compresión paralelos a su longitud, pero se deforma fácilmente cuando la carga se aplica lateralmente. Asimismo, las fluctuaciones en el grado de humedad hacen que se flexionen las paredes del tubo, mientras que tienen muy poca influencia sobre la longitud del mismo.

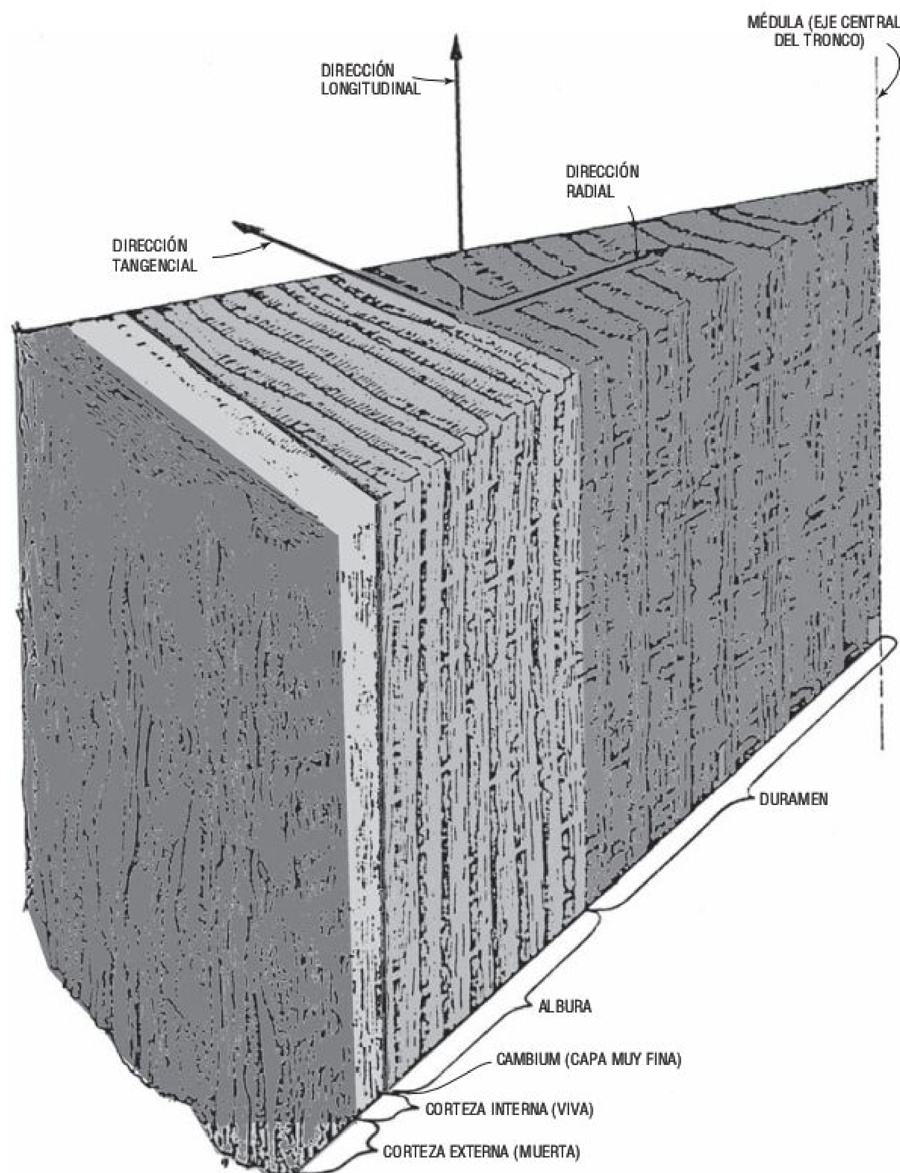


FIGURA 10.4 Partes principales de un tronco típico de árbol.

10.2 Composición química

La madera está compuesta de celulosa, lignina, hemicelulosa, sustancias extraibles y minerales generadores de ceniza. La celulosa representa aproximadamente un 50% del peso total de la sustancia de la madera (USDA-FS, 1999). El porcentaje exacto depende de cada especie. Es un polímero lineal (un compuesto de carbono alifático) que tiene un alto peso molecular. El principal bloque componente de la celulosa es el azúcar–glucosa. A medida que crece el árbol, las moléculas lineales de celulosa se disponen en haces extremadamente ordenados, denominados *fibrillas*. Estos haces ordenados forman los elementos estructurales que componen las paredes celulares de las fibras de madera.

La lignina representa entre un 23% y un 33% de la madera de coníferas y entre un 16% y un 25% de la madera de frondosas, estando expresados dichos porcentajes en peso. La lignina es principalmente un material intercelular. Químicamente, la lignina es un material intratable e insoluble, que está débilmente unido a la celulosa. La lignina es, básicamente, el aglutinante que mantiene juntas las células tubulares. La resistencia cortante longitudinal de la madera está limitada por la resistencia de las uniones de lignina.

Las hemicelulosas o poliosas son unidades poliméricas formadas por moléculas de azúcar. La hemicelulosa difiere de la celulosa en que tiene varios azúcares unidos a su estructura celular. La madera de frondosas contiene de un 20% a un 30% de hemicelulosa, mientras que en la madera de coníferas la hemicelulosa representa entre un 15% y un 20%. Los principales azúcares existentes en la madera de frondosas y de coníferas son la xilosa y la manosa, respectivamente.

Las sustancias extraibles representan entre un 5% y un 30% de la sustancia de la madera. En este grupo se incluyen los taninos y otros polifenoles, los compuestos coloreantes, aceites esenciales, grasas, resinas, ceras, colas, almidones y simples productos metabólicos intermedios. Estos materiales pueden eliminarse con simples disolventes neutros inertes, como el agua, el alcohol, la acetona y el benceno. La cantidad existente en cada árbol individual depende de la especie, de las condiciones de crecimiento y de la época del año en que se produce el apeo del árbol.

Los materiales generadores de ceniza representan entre un 0,1% y un 0,3% de la madera e incluyen el calcio, el potasio, el fosfato y el silicio.

10.3 Grado de humedad

El grado de humedad de un elemento de madera es el peso de agua existente en el elemento, expresado como un porcentaje del peso de la madera después de secada en el horno. Una muestra de madera seca será aquella que haya sido secada en un horno a

una temperatura de entre 100°C y 105°C (212°F y 220°F) hasta que la madera adquiera un peso constante. Diversas propiedades físicas, como el peso, la contracción y la resistencia dependen del grado de humedad de la madera.

La humedad existente en la madera puede ser *ligada* o *libre*. El agua ligada se mantiene dentro de la pared celular mediante fuerzas de adsorción, mientras que el agua libre se encuentra en forma de agua condensada o de vapor de agua en las cavidades de las células. En la madera verde, las paredes celulares están saturadas, mientras que las cavidades celulares pueden contener o no agua libre. El nivel de saturación para el que las paredes celulares están saturadas pero sin que exista agua libre en las cavidades de las células se denomina *punto de saturación de la fibra* (FSP, *Fiber Saturation Point*). El FSP varía de una especie a otra, pero está normalmente comprendido en el rango del 21% al 32%. El FSP tiene una gran importancia práctica porque el incremento o reducción de humedad por debajo del FSP tiene un gran efecto sobre prácticamente todas las propiedades físicas y mecánicas de la madera, mientras que por encima del FSP, las propiedades son independientes del grado de humedad.

Cuando el grado de humedad de la madera está por encima del punto de saturación de la fibra, la madera es dimensionalmente estable. Sin embargo, las fluctuaciones en el grado de humedad por debajo del FSP siempre provocan cambios dimensionales. La contracción o merma está causada por la pérdida de humedad de las paredes celulares; a la inversa, la hinchazón está provocada por el aumento del grado de humedad en las paredes celulares. La Figura 10.5 muestra que los cambios en las dimensiones de la madera varían de una dirección a otra. Los cambios dimensionales en la dirección radial son, generalmente, la mitad de los cambios en la dirección tangencial. La hinchazón y la contracción en la dirección longitudinal son, por su parte, mínimas, típicamente de entre el 0,1% y el 0,2% para una variación en el grado de humedad que vaya desde el FSP hasta la condición de madera seca. Esta anisotropía de los cambios dimensionales de la madera provoca deformaciones, agrietamientos, fracturas y problemas de comportamiento estructural, como explicaremos posteriormente con más detalle en este capítulo. También es la razón de que los patrones de aserrado de los tableros afecten al

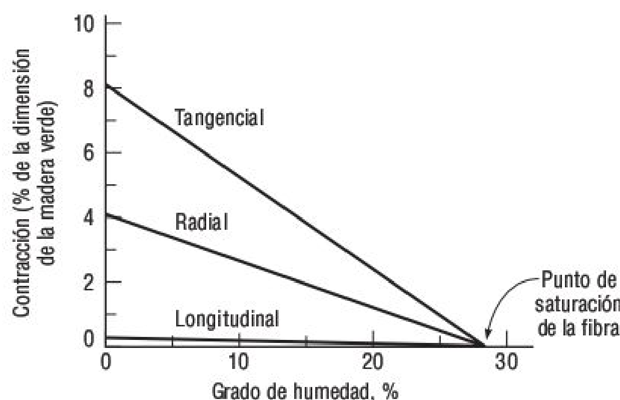


FIGURA 10.5 Relación entre la contracción y el grado de humedad.

grado de distorsión experimentado cuando se somete a esos tableros a varaiciones en el grado de humedad.

El grado de humedad de la madera varía dependiendo de la temperatura y de la humedad del aire. Sin embargo, la variación natural del grado de humedad es un proceso lento, de modo que a medida que varían las condiciones atmosféricas, el grado de humedad de la madera tiende a ajustarse a unas condiciones próximas al valor promedio. El grado de humedad para las condiciones atmosféricas medias se denomina *contenido de humedad de equilibrio (EMC, Equilibrium Moisture Content)*. El Servicio de Bosques de Estados Unidos ha determinado una serie de valores del EMC en función de la temperatura y de la humedad. El EMC va desde un valor inferior al 1% para temperaturas superiores a 55°C (130°F) y una humedad del 5% a más del 20% para temperaturas por debajo de 27°C (80°F) y un 90% de humedad.

Problema de ejemplo 10.1

Se corta un tablero de madera de 250 mm de anchura, de tal forma que esa anchura se encuentra en la dirección tangencial a los anillos de crecimiento anuales. Calcule la variación de la anchura cuando el grado de humedad varíe entre el 15% y el 32%, si el punto de saturación de la fibra para ese tipo de madera es del 27% y si esa clase de madera se contrae un 7,8% en la dirección tangencial al secarse desde el punto FSP hasta la condición de madera seca.

Solución

Por encima del FSP no se produce ninguna hinchazón. Al incrementar el grado de humedad del 15% al 27% sí que se producirá una hinchazón. A partir de los datos proporcionados, el tablero de madera se hinchará un 7,8% para un 27% de variación del grado de humedad (desde un grado de humedad de cero hasta el punto FSP).

Porcentaje de hinchazón = (7,8/27) × (27 − 25) = 3,5%

Variación de la dimensión = 250 × (3,5/100) = 8,7 mm

Nueva dimensión = 258,7 mm

10.4 Producción de madera

El apeo de los árboles se produce en el otoño o el invierno, debido a su contenido de agua y a las medidas de protección medioambiental relacionadas con el peligro de incendio y con el crecimiento de otras plantas. A lo largo de los años, se ha desarrollado una gran industria en el sector de la silvicultura para recolectar y procesar la madera. La madera se recolecta en los bosques en forma de *troncos*. Estos se transportan a las serrerías, donde se cortan con unas ciertas dimensiones para obtener diversos productos para aplicaciones de ingeniería:

1. *Madera aserrada.* Se trata de piezas aserradas con caras paralelas entre sí. Si los cantos están completamente aserrados, decimos que la madera está escuadrada. Si los cantos no están aserrados o solo lo están parcialmente, decimos que la madera es no escuadrada. Los tamaños son muy variables, existiendo diversas denominaciones genéricas:

   - Tablas, con un grosor de entre 18 y 38 mm, una anchura entre 100 y 250 mm y una longitud superior a un metro.
   - Tablones, con un grosor de entre 50 mm y 120 mm, una anchura entre 150 y 250 mm y una longitud superior a un metro.
   - Viguetas y largueros con un grosor superior a 40 mm y una anchura inferior a 150 mm.
   - Vigas y traviesas, con un grosor entre 120 y 150 mm, una anchura entre 180 y 280 mm y longitudes variables.

   Las aplicaciones de las maderas aserradas en construcción son muy variadas, yendo desde la creación de armazones estructurales hasta la colocación de traviesas de ferrocarril o de elementos decorativos en edificios y jardines.

2. *Madera en rollo.* Piezas de madera redondeadas, usadas como pilotes, postes o vigas.

3. *Productos de madera manufacturados.* Productos fabricados uniendo virutas, chapas, tiras y otros tipos de fibras de madera para formar una unidad compuesta de mayor tamaño. Estos productos se fabrican y prueban para que tengan respuestas mecánicas específicas a las cargas. Entre los productos de madera manufacturados para aplicaciones estructurales se incluyen:
   - Paneles estructurales, incluyendo contrachapados, tableros de tiras orientadas y paneles compuestos.
   - Madera laminada encolada (glulam).
   - Madera compuesta estructural.
   - Elementos estructurales compuestos.

4. También se sierran y fabrican elementos especiales para reducir el tiempo de construcción. Entre estos elementos se incluyen diversos tipos de útiles que facilitan el trabajo en la obra.

   La producción de madera aserrada se compone de los siguientes pasos:
   - Aserrado para dar a la madera la forma deseada.
   - Curado.
   - Labrado.
   - Clasificación.
   - Tratamiento de conservación (opcional).

El labrado (aplanado) de la superficie de la madera para obtener una cara suave puede hacerse antes o después del secado. El labrado posterior al secado es más conveniente, porque permite eliminar los pequeños defectos que aparecen durante el proceso de se-

cado. Cuando el labrado se efectúa antes del curado, las dimensiones se incrementan ligeramente para compensar la contracción experimentada durante el secado.

10.4.1 Técnicas de corte

La madera recolectada se corta para formar tablones y vigas en las serrerías, utilizando sierras circulares, sierras de cinta o sierras alternativas. Los patrones de aserrado más comunes para los troncos son el *aserrado normal*, el *aserrado por cuartos* y el *aserrado combinado*, ilustrados en la Figura 10.6. (Levin, 1972).

La calidad de los tableros está relacionada con el ángulo que forman los anillos de crecimiento anual con la cara del tablero (es decir, el ángulo entre el anillo de crecimiento y la cuchilla de la sierra). Hay tres categorías, como se ilustra en la Figura 10.7:

1. Aserrado tangencial de 45° o menor.
2. Aserrado al bies de entre 45° y 80°.
3. Aserrado circular o vertical, de entre 80° y 90°.

Los tableros con aserrado tangencial presentan una exposición muy deseable de la veta para aplicaciones decorativas. Sin embargo, los tableros con este aserrado tienden a deformarse más que los de aserrado circular en respuesta a las fluctuaciones de humedad. Por esta razón, los tableros con aserrado circular generalmente son mejores para aplicaciones estructurales.

El patrón de aserrado que se seleccione dependerá de la sección transversal del árbol, de la capacidad de la serrería y del producto deseado. El aserrado normal es rápido y económico, mientras que el aserrado por cuartos permite maximizar la cantidad de cortes con aserrado circular. En la Tabla 10.2 se resumen algunas de las ventajas de los distintos patrones de aserrado.

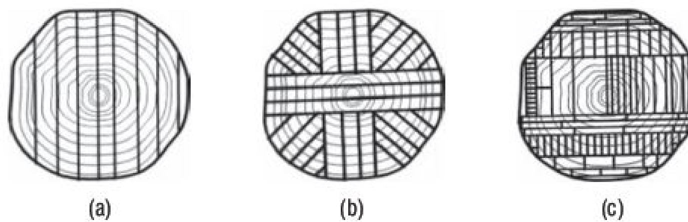


FIGURA 10.6 Patrones comunes de aserrado de troncos: (a) aserrado normal, (b) aserrado por cuartos y (c) aserrado combinado.

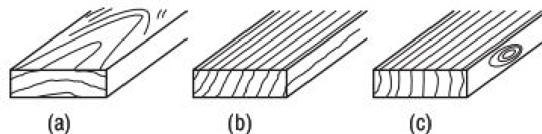


FIGURA 10.7 Tipos de corte en los tableros: (a) aserrado tangencial, (b) aserrado al bies y (c) aserrado circular o vertical.

TABLA 10.2 Ventajas del aserrado normal y del aserrado por cuartos.

Aserrado normal	Aserrado por cuartos
Se contrae y se hincha menos en la dirección del espesor.	Se contrae y se hincha menos en el sentido de la anchura.
La apariencia superficial se ve menos afectada por los nudos redondos u ovales, si se compara con el efecto de los nudos longitudinales en los tableros aserrados por cuartos; los tableros con nudos redondos u ovales no son tan débiles como los que presentan nudos longitudinales.	Menos atejados, fendas superficiales y fendas de desecación al realizar el curado y durante el uso.
Las fendas y bolsas resiníferas, cuando están presentes, afectan a menos tableros.	Las vetas provocadas por la separación de los anillos de crecimiento anual no son tan pronunciadas.
Los patrones resultantes de los anillos de crecimiento anual y algunos otros tipos de patrones resultan mucho más visibles.	Los patrones resultantes de la existencia de radios pronunciados, fibras entrelazadas y fibras sinuosas resaltan mucho más.
Menos susceptible de colapsarse al secarse.	No permite pasar fácilmente a los líquidos en algunas especies.
Cuesta menos porque es fácil de obtener.	Mantiene mejor la pintura en algunas especies.
	Aparece la albura en los bordes de los tableros y su anchura está limitada por la del tronco.

10.4.2 Curado

La madera verde, en los árboles vivos, contiene entre un 30% y un 200% de humedad en relación con el peso de la madera seca. El curado elimina el exceso de humedad de la madera. Para la madera estructural, el grado de humedad recomendado varía entre el 7% en las regiones secas y el 14% en las regiones húmedas costeras. Sin embargo, al salir de la serrería, la madera para construcción suele tener un grado medio de humedad del 15%.

La madera se cura al aire y en hornos de secado. El secado al aire resulta muy barato, pero es lento. La madera verde se almacena en pilas cubiertas para que se seque. Estas pilas están formadas por capas sucesivas de tableros, separadas por 25 mm (1 pulgada), de modo que el aire pueda fluir entre las capas. El tiempo requerido para el secado varía con el clima y la temperatura de la región. Normalmente, el tiempo máximo de secado al aire está comprendido entre tres y cuatro meses. El secado al aire estará completo cuando el grado de humedad de la madera esté en equilibrio con la humedad del aire circundante. Es posible, sin embargo, que no se pueda conseguir el grado de humedad óptimo si se utiliza el secado al aire.

Después del secado al aire, la madera se puede secar en un horno. Se emplean hornos de gran tamaño en los que todas las variables pueden monitorizarse de forma precisa. Las temperaturas de secado en un horno están comprendidas entre 20°C y 50°C (70°F y 120°F), requiriéndose normalmente entre 4 y 10 días. El grado de humedad de la madera debe reducirse lentamente, ya que un secado demasiado rápido puede provocar la aparición de grietas y deformaciones. La madera secada en horno volverá a absorber humedad si se la expone al agua, por tanto, es preciso tener cuidado al almacenar y transportar la madera.

10.5 Clasificación estructural

El paso final en la producción de madera implica clasificarla de acuerdo con su calidad. Normalmente, la madera se clasifica de acuerdo con el número de fallos que afectan a su resistencia, su durabilidad o a la facilidad de trabajo con la misma. Las características más comunes reductoras de la calidad de la madera son los nudos, las fendas, las bolsas resiníferas y las manchas. Debido al alto grado de variabilidad natural de la madera, es prácticamente imposible desarrollar un conjunto exacto y uniforme de estándares de clasificación. Como resultado, las técnicas estándares de clasificación varían de unas organizaciones a otras y de unos países a otros.

La madera aserrada para uso estructural se clasifica mediante dos métodos: clasificación visual y clasificación mecánica. Ambos métodos se basan en un estudio por ensayos de madera clasificada según los parámetros de cada método. El más extendido es el de la clasificación visual en el que se miden las singularidades (o defectos) de las piezas. La clasificación mecánica es menos frecuente y se lleva a cabo mediante un ensayo no destructivo a la flexión.

10.5.1 Clasificación visual

Cada país emplea una norma de clasificación diferente para sus especies en la que se define la presencia y frecuencia de las singularidades naturales de sus maderas (nudos, desviación de la fibra, fendas, acebolladuras, anillos de crecimiento, gemas, deformaciones, etc.). En la práctica, se exige el examen visual de las cuatro caras de cada pieza a clasificar.

En el proceso de unificación de la normativa europea se redactó una norma "marco" que especifica los requisitos mínimos que deben cumplir las normas de clasificación particulares de cada país. La norma de clasificación española es la UNE 56544 que asigna una clase resistente a cada una de las combinaciones de especie y calidad. Esta norma establece dos calidades: ME-1 y ME-2 (ME = Madera Estructural) y una clase MEG para vigas de grandes escuadrías.

Junto con la calidad es preciso indicar la clase correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de la clasificación: madera húmeda (*wet graded*) o madera seca (*dry graded*).

TABLA 10.3 Clases resistentes según la norma UNE EN 338.

	Clases resistentes
Coníferas y chopo	C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C 40, C45 y C50.
Frondosas	D 30, D 35, D 40, D 50, D 60 y D 70

El sistema de clases resistentes adoptado está definido en la norma UNE EN 338 que distingue las clases enumeradas en la Tabla 10.3.

El número que acompaña a la letra "C" o "D" es la resistencia característica a la flexión expresada en N/mm^2. Así por ejemplo, una clase resistente "C18" tiene una resistencia característica a la flexión de 18 N/mm^2 (obtenida en ensayo normalizado y significa que de 100 piezas sólo cinco tendrían resistencias inferiores). En la Tabla 10.4 se detallan los valores de las propiedades mecánicas de cada clase resistente.

10.6 Defectos de la madera

La madera puede presentar defectos que afecten a su apariencia, a sus propiedades mecánicas o ambas cosas. Estos defectos pueden tener múltiples causas, como el crecimiento natural de la madera, las enfermedades de los árboles, los animales parásitos, el curado excesivamente rápido o el procesamiento defectuoso de la madera. En la Figura 10.8 se muestran algunos tipos de defectos comunes.

Nudos Los nudos son bases de ramas que han quedado incorporadas en la madera del tronco del árbol o de otra rama. Los nudos degradan las propiedades mecánicas de la madera, afectando a su resistencia a la flexión y a la tracción. Sin embargo, la presencia de nudos sanos y apretados puede incrementar la resistencia a la compresión, la dureza y las características cortantes de la madera.

Fendas Las fendas son separaciones en la madera en sentido longitudinal, que aparecen entre los anillos de crecimiento anual. Se desarrollan antes de cortar la madera y pueden deberse a vientos fuertes.

Gemas Las gemas son trozos de corteza o de otros materiales blandos que quedan en el borde del tablero.

Bandas de savia Son espesas acumulaciones de savia en las fibras de la madera, que producen una mancha de color distintiva.

Madera de reacción Es un tejido leñoso anormal que se forma en las ramas o troncos torcidos. La madera de reacción hace que la médula esté descentrada con respecto al eje neutral del árbol. Provoca la aparición de esfuerzos internos que pueden dar lugar a deformaciones y agrietamientos longitudinales.

TABLA 10.4 Propiedades mecánicas de las clases resistentes para las especies coníferas y el chopo .

		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades resistentes en N/mm²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cortante	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Mód. elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16
Mód. elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Mód. elasticidad perpendicular medio	$E_{90,\ medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad en Kg/m³													
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	ρ_{media}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

TABLA 10.4 Propiedades mecánicas de las clases resistentes para las especies frondosas.

		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propiedades resistentes en N/mm²							
Flexión	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²							
Mód. elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	10	10	11	14	17	20
Mód. elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,k}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,89
Mód. elasticidad perpendicular medio	$E_{90,\ medio}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo de cortante medio	G	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Densidad en Kg/m³							
Densidad característica	ρ_k	530	560	590	650	700	900
Densidad media	ρ_{media}	640	670	700	780	840	1080

Bolsas resiníferas Son aberturas bien definidas entre los anillos anuales que contienen resina libre. Normalmente, solo los abetos, pinos, piceas y alerces tienen bolsas resiníferas.

Entrecorteza Son pequeños fragmentos de corteza incrustados en la madera. Estas bolsas se forman como resultado de daños sufridos por el árbol, que provocan la muerte de una pequeña área del cambium. La parte del árbol circundante continuará creciendo, llegando a cubrir el área muerta con una capa de cambium.

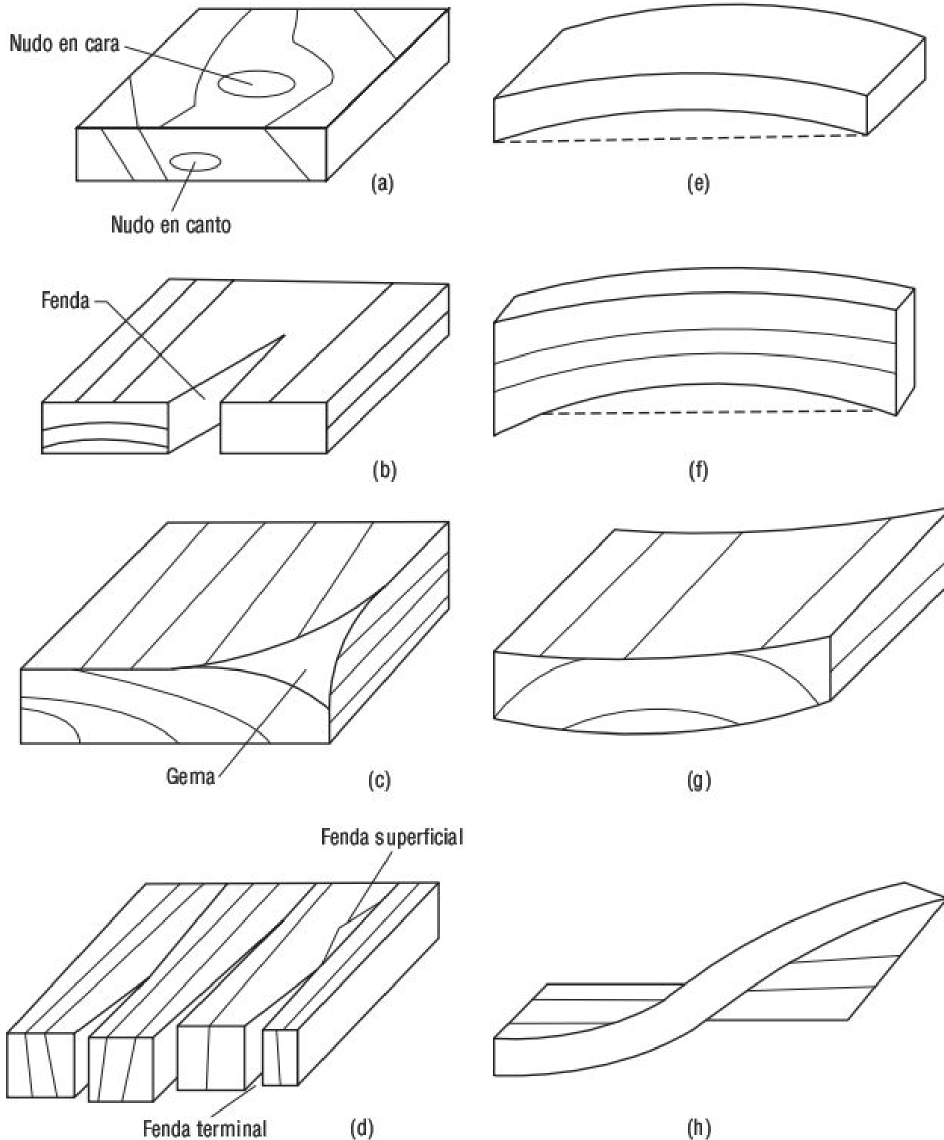


FIGURA 10.8 Defectos comunes de la madera: (a) nudos, (b) fendas, (c) gemas, (d) fendas de secado, (e) curvatura de cara, (f) curvatura de canto, (g) abarquillamiento y (h) alabeo.

Fendas de secado Son agrietamientos de la madera que se producen a lo largo de la veta y que se desarrollan durante el curado. Pueden aparecer en la superficie o en el extremo de un tablero. Las fendas superficiales son el resultado de la separación de las células de madera temprana (que tienen paredes más finas) y solo suelen aparecer en las superficies más planas. Las grietas debidas a las fendas terminales suelen seguir la veta de la madera y provocan la aparición de cuñas en los extremos de los tableros.

Deformaciones Son distorsiones de la madera con respecto al plano deseado. Los cuatro tipos principales de deformación son la *curvatura de cara,* la *curvatura de canto,* el *abarquillamiento* y el *alabeo.* La curvatura de cara es una curvatura longitudinal de extremo a extremo. La curvatura de canto es una curvatura longitudinal de lado a lado. Ambos defectos aparecen como resultado de una contracción longitudinal diferencial. El abarquillamiento es la desviación de ambos bordes hacia arriba o hacia abajo. El alabeo es la elevación de una de las esquinas, de modo que dicha esquina se sale del plano formado por las otras tres. Las deformaciones se deben a las diferencias en el secado entre unas zonas y otras en el entorno de producción, aunque también pueden aparecer como resultado de la liberación de las tensiones internas del árbol.

Vetas resaltadas Son defectos que aparecen durante el corte y el acabado de la madera y provocan que la veta resalte respecto a la madera circundante.

Desconchones Son defectos que se producen cuando un trozo de madera salta del tablero por la acción de las herramientas de corte o de pulido.

Quemaduras Son áreas oscurecidas por un sobrecalentamiento durante el corte.

10.7 Propiedades físicas

Entre las propiedades físicas más importantes se incluyen la gravedad específica, la densidad, las propiedades térmicas y las propiedades eléctricas.

10.7.1 Gravedad específica y densidad

La gravedad específica de la madera depende del tamaño de las células de la madera, del espesor de las paredes celulares y del número y tipo de células. Independientemente de la especie, la sustancia que compone las paredes celulares tiene una gravedad específica de 1,5. Debido a esta uniformidad, la gravedad específica es un índice excelente de la cantidad de sustancia que una pieza seca de madera contiene realmente y es prácticamente constante dentro de cada especie. Por tanto, la gravedad específica o densidad es una propiedad que se suele emplear bastante y constituye un indicador de las propiedades mecánicas dentro de un trozo de madera limpio y de vetas rectas.

La densidad en seco de la madera varía entre 160 kg/m^3 (10 libras/pie^3) para la madera de balsa y 1000 kg/m^3 (65 libras/pie^3) para algunas especies. La mayoría de las maderas presentan densidades que se encuentran en el rango de 300 a 700 kg/m^3 (20 a 45 libras/pie^3). Dentro de una misma especie, las densidades pueden variar un ±10%.

10.7.2 Propiedades térmicas

Las cuatro propiedades térmicas de la madera son la conductividad térmica, el calor específico, la difusividad térmica y el coeficiente de expansión térmica.

Conductividad térmica Es una medida de la velocidad con la que fluye el calor a través de un material. El recíproco de la conductividad térmica es la resistencia térmica (o valor de aislamiento, R). La madera tiene una conductividad térmica que es una fracción del valor de dicho parámetro en la mayoría de los metales y tres o cuatro veces superior al de los materiales aislantes comunes. La conductividad térmica varía desde 0,06 W/(m°K) [0,34 Btu/(h-ft-°F)] para la madera de balsa a 0,17 W/(m°K) [1,16 Btu/(h-ft-°F)] para algunos tipos de olmo. Las maderas para aplicaciones estructurales tienen un valor medio de 0,12 W/(m°K) [0,07 Btu/(h-ft-°F)] comparado con los 200 W/(m°K) [115 Btu/(h-ft-°F)] del aluminio y los 0,04 W/(m°K) [0,025 Btu/(h-ft-°F)] de la lana. La conductividad térmica de la madera depende de diversos factores: (1) la orientación de la veta, (2) el grado de humedad, (3) la gravedad específica, (4) el contenido de elementos extraibles y (5) las irregularidades estructurales, como por ejemplo nudos.

El flujo de calor en la madera en las direcciones radial y tangencial (con respecto a los anillos de crecimiento) es prácticamente uniforme. Sin embargo, el flujo de calor en la madera en la dirección longitudinal (paralela a la veta) es de 2,0 a 2,8 veces superior que en la dirección radial.

El grado de humedad tiene una enorme influencia sobre la conductividad térmica. Cuando la madera está seca, las células están llenas de aire y la conductividad térmica es muy baja. A medida que aumenta el grado de humedad, también lo hace la conductividad térmica. Cuando el grado de humedad pasa del 0% al 40%, la conductividad térmica aumenta aproximadamente un 30%.

Debido al material sólido de las paredes celulares en las maderas pesadas, estas conducen el calor más rápido que las maderas ligeras. Esta relación entre la gravedad específica y la conductividad térmica de la madera es lineal. También afectan a la transferencia de calor de la madera los incrementos en porcentaje de material extraible y de densidad (por ejemplo, nudos) que incrementan la conductividad térmica.

Calor específico El calor específico de un material es la relación entre la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura del material un grado y la cantidad de calor requerida para elevar un grado la temperatura de una masa igual de agua. El calor específico de la madera está en buena medida determinado por la temperatura y el grado de humedad, teniendo muy poco efecto o ninguno, la especie del árbol y la densidad. Cuando la madera contiene agua, el calor específico se incrementa, porque el calor específico del agua es mayor que el de la madera seca. Sin embargo, el valor del calor

específico de la madera húmeda es mayor que la suma de los calores específicos de la madera seca y del agua. Este incremento de calor específico, más allá de la suma del de los dos componentes, se debe a que las uniones entre las moléculas de agua y la madera absorben energía. Un incremento de la temperatura hace que aumente la absorción de energía de la madera y da como resultado un incremento del calor específico.

Difusividad térmica La difusividad térmica es una medida de la velocidad con la que un material absorbe el calor de su entorno. La difusividad térmica de la madera es mucho más pequeña que la de otros materiales comunes para construcción. Generalmente, la madera tiene un valor promedio de difusividad térmica de unos 0,006 mm/seg. (0,00025 pulg./seg.), comparado con el del acero, cuya difusividad térmica es de 0,5 mm/seg. (0,02 pulg./seg.). Debido a la baja difusividad térmica de la madera, esta no parece ni caliente ni fría al tacto, a diferencia de otros materiales. La baja conductividad térmica, la densidad moderada y el moderado calor específico contribuyen a que la difusividad térmica de la madera tenga un valor bajo.

Coeficiente de expansión térmica El coeficiente de expansión térmica es una medida de los cambios dimensionales provocados por una variación de la temperatura. Los coeficientes de expansión térmica para una madera completamente seca son positivos en todas las direcciones. Tanto para las maderas de coníferas como de frondosas, los valores del coeficiente longitudinal (paralelo a la veta) están comprendidos entre 0,009 y 0,0014 mm/m/°C (0,0000017 y 0,0000025 pulg./pulg./°F). Los coeficientes de expansión son proporcionales a la densidad y son, por tanto, entre cinco y diez veces superiores en las direcciones transversales a la veta que en la direcciones paralelas a la misma.

Cuando se calienta madera húmeda, esta se expande debido a la expansión térmica y luego se contrae a causa de la pérdida de humedad (por debajo del punto de saturación de la fibra). Esta hinchazón y contracción combinadas normalmente dan como resultado una contracción neta. La mayoría de las maderas para niveles de humedad normales reaccionan de esta forma.

10.7.3 Propiedades eléctricas

La madera secada al aire es un buen aislante eléctrico. A medida que se incrementa el grado de humedad de la madera, la resistividad se reduce en un factor de tres por cada 1% de variación en el grado de humedad. Sin embargo, cuando la madera alcanza el punto de saturación de la fibra, adopta el valor de resistividad del agua.

10.8 Propiedades mecánicas

Conocer las propiedades mecánicas de la madera es un prerrequisito para poder diseñar adecuadamente una estructura de madera. Entre las propiedades mecánicas típicas

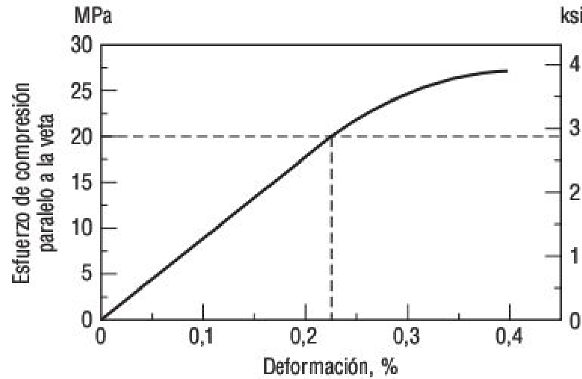


FIGURA 10.9 Relación típica esfuerzo-deformación para la madera.

que son interesantes para los ingenieros civiles y de la construcción se incluyen el módulo de elasticidad, las propiedades de resistencia, la reptación y la capacidad de amortiguación.

10.8.1 Módulo de elasticidad

La relación típica esfuerzo–deformación de la madera es lineal hasta un cierto límite, seguido de una pequeña curva no lineal después de la cual se produce la fractura, como se muestra en la Figura 10.9. El módulo de elasticidad de la madera es la pendiente de la parte lineal de la curva esfuerzo–deformación representativa. La relación esfuerzo–deformación de la madera varía de unas especies a otras y dentro de una misma especie, y está influida por las variaciones en el grado de humedad y en la gravedad específica. Asimismo, puesto que la madera es anisotrópica, existen diferentes relaciones esfuerzo–deformación para las diferentes direcciones. Los módulos de elasticidad según los ejes longitudinal, radial y tangencial suelen ser distintos.

10.8.2 Propiedades de resistencia

Las propiedades de resistencia de la madera varían en gran medida, dependiendo de la orientación de la veta con respecto a la dirección de la fuerza. Por ejemplo, la resistencia a la tracción en la dirección longitudinal (paralela a la veta) es más de 20 veces mayor que la resistencia a la tracción en la dirección radial (perpendicular a la veta). Asimismo, la resistencia a la tracción en la dirección longitudinal es mayor que la resistencia a la compresión en la misma dirección. Entre las propiedades comunes de la madera se incluyen el módulo de fractura en flexión, la resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la veta y la resistencia cortante paralela a la veta. Otras propiedades de resistencia menos comunes son la resistencia a la tracción paralela a la veta, la torsión, la tenacidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia cortante rodante.

10.8.3 Reptación

Bajo cargas sostenidas, la madera continúa deformándose, fenómeno que se conoce con el fenómeno de reptación. Los valores de diseño para las propiedades de los materiales contemplan someter completamente a los elementos a los valores de diseño tabulados durante un periodo de 10 años y/o la aplicación del 90% de la carga máxima de manera continua durante toda la vida útil de la estructura. Si se exceden los niveles máximos de esfuerzo, la estructura puede deformarse prematuramente.

10.8.4 Capacidad de amortiguación

La amortiguación es el fenómeno por el cual la amplitud de una vibración en un material se reduce con el tiempo. Esa reducción de amplitud se debe a la fricción interna dentro del material y a la resistencia del sistema de soporte. El grado de humedad y la temperatura afectan en gran medida a la fricción interna en la madera. A temperatura ambiente normal, un incremento en el grado de humedad produce un incremento proporcional en la fricción interna, hasta el punto de saturación de la fibra. En condiciones normales de temperatura y humedad, la fricción interna en la madera (paralela a la veta) es 10 veces superior a la de los metales utilizados en los elementos estructurales. A causa de estas cualidades, las estructuras de madera amortiguan más rápidamente las vibraciones que otras estructuras de metal de diseño similar.

10.9 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas

Los métodos normalizados de ensayos mecánicos para la madera están diseñados casi exclusivamente para obtener datos que permitan predecir su comportamiento. Para conseguir la reproducibilidad en el entorno de ensayo, las especificaciones incluyen métodos de preparación y selección de los materiales, técnicas y equipos de pruebas y métodos informáticos para la reducción de los datos. Son muchos los organismos que publican normas para ensayos de maderas y de compuestos de madera, como por ejemplo ASTM, el Instituto Nacional de Estandarización (NSI, *National Standard Institute*), AENOR en España y otras muchas asociaciones y organismos públicos.

Debido a las muchas variables que afectan a los resultados de las pruebas, tiene una importancia fundamental seleccionar correctamente la probeta y el tipo de ensayo. Existen dos técnicas de ensayo principales que permiten establecer los parámetros de resistencia: el ensayo de probetas representativas, pequeñas y limpias, y el ensayo de elementos completos utilizados en estructuras.

El objetivo principal de ensayar probetas pequeñas y limpias es obtener las propiedades metálicas de varias especies y proporcionar un método de control y comparación para las actividades de producción. La prueba de elementos estructurales completos proporciona relaciones entre propiedades mecánicas y físicas, datos sobre esfuerzos de tra-

bajo, correlaciones entre condiciones ambientales, datos sobre imperfecciones de la madera y propiedades mecánicas. La norma ASTM D 143 presenta los estándares de ensayo completos para probetas pequeñas y limpias de madera. Esta norma proporciona descripciones completas relativas a la obtención, preparación y ensayo de las muestras. Entre los ensayos mecánicos incluidos en este estándar se encuentran:

- Flexión estática
- Flexión de impacto
- Compresión perpendicular a la veta
- Cortante paralela a la veta
- Tracción paralela a la veta
- Extracción de clavos
- Contracción radial y tangencial
- Compresión paralela a la veta
- Tenacidad
- Dureza
- Exfoliación
- Tracción perpendicular a la veta
- Gravedad específica y contracción en volumen
- Determinación del grado de humedad

La Figura 10.10 muestra un esquemático de probetas de ensayo de madera probadas en tracción, compresión, flexión y dureza. Habitualmente se usan ensayos de flexión estática y de impacto, de compresión y tracción paralelas y perpendiculares a la veta y de cortante paralela a la veta.

10.9.1 Ensayo de flexión estática

El ensayo de flexión estática se realiza con probetas de 50 × 50 × 760 mm (2 × 2 × 30 pulgadas) o 25 × 25 × 410 mm (1 × 1 × 16 pulgadas). Para las probetas de mayor tamaño, el cabezal de carga se coloca en el centro de la probeta y con un vano de 710 mm (28 pulgadas) y la carga se aplica con una velocidad de 2,5 mm/min. (0,1 pulg./min.). Para las probetas más pequeñas, el cabezal de carga se coloca en el centro de la probeta y con un vano de 360 mm (14 pulg.) y la carga se aplica a una velocidad de 1,3 mm/min. (0,05 pulg./min.). Los datos que relacionan la deflexión con la

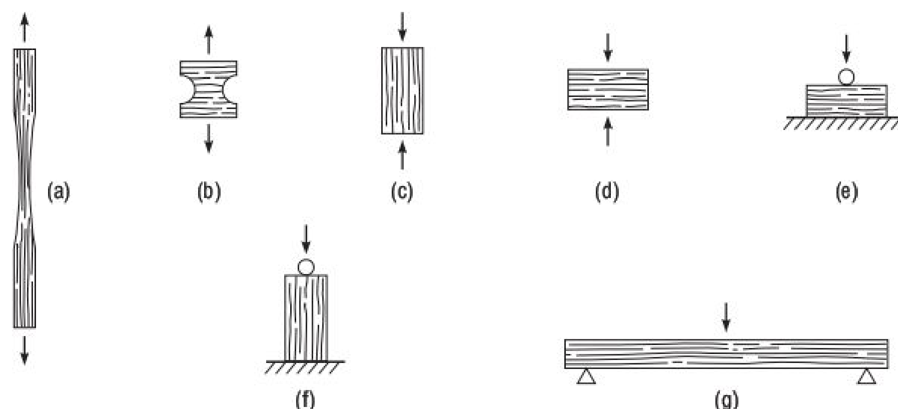


FIGURA 10.10 Probetas de ensayo de madera: (a) tracción paralela a la veta, (b) tracción perpendicular a la veta, (c) compresión paralela a la veta, (d) compresión perpendicular a la veta, (e) dureza perpendicular a la veta, (f) dureza paralela a la veta y (g) flexión. (© Pearson Education, Inc. Utilizada con su permiso.)

carga se registran hasta el valor máximo de carga, o incluso más allá del mismo. Dentro del límite de proporcionalidad, las lecturas se aproximan al múltiplo más próximo de 0,02 mm (0,001 pulg.). Más allá del límite de proporcionalidad, las lecturas de flexión suelen medirse con una galga, hasta el límite de lectura del aparato, normalmente de 25 mm (1 pulg.). En el ensayo se registran la carga y la deflexión de la primera fractura, la carga máxima y los puntos de cambio súbito. La apariencia de la fractura se describe como quebradiza o fibrosa. Una apariencia quebradiza indica una fractura limpia, mientras que la fibrosa indica una fractura con astillado.

Problema de ejemplo 10.2

Se realiza un ensayo de flexión estática sobre una muestra de madera de 50 × 50 × 760 mm, de acuerdo con el procedimiento ASTM D143 (longitud del vano entre soportes = 710 mm). Si la carga máxima es de 2,67 kN, calcule el módulo de fractura.

Solución

$$\text{Módulo de fractura} = \frac{Mc}{I}$$

donde

M = momento de flexión para carga máxima
c = 1/2 de la altura de la probeta
I = momento de inercia de la sección transversal de la probeta

$$\text{Fuerza de reacción en cada soporte, en la fractura} = \frac{2{,}67}{2} = 1{,}335 \text{ kN}$$

$$\text{Momento de flexión en el centro, en la fractura} = 1{,}335 \times \left(\frac{710}{2}\right) = 473{,}9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$I = \frac{(0{,}05)(0{,}05)^3}{12} = 5{,}21 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$\text{Módulo de fractura} = \frac{473{,}9 \times 0{,}025}{5{,}21 \times 10^{-7}} = 22{,}75 \text{ MPa}$$

10.9.2 Ensayos de compresión

El ensayo de compresión paralelo a la veta se realiza con probetas de 50 × 50 × 200 mm (2 × 2 × 8 pulgadas) o 25 × 25 × 100 mm (1 × 1 × 4 pulg.), como se ilustra en la Figura 10.11. La carga se aplica a una velocidad igual a 0,003 mm/mm (pulg./pulg.) de la longitud nominal de la probeta por minuto. Las deformaciones se registran redondeándolas a múltiplos de 0,002 mm (0,0001 pulg.) sobre una longitud de galga no superior a 150 mm (6 pulg.) para las probetas de mayor tamaño, o 50 mm (2 pulg.) para

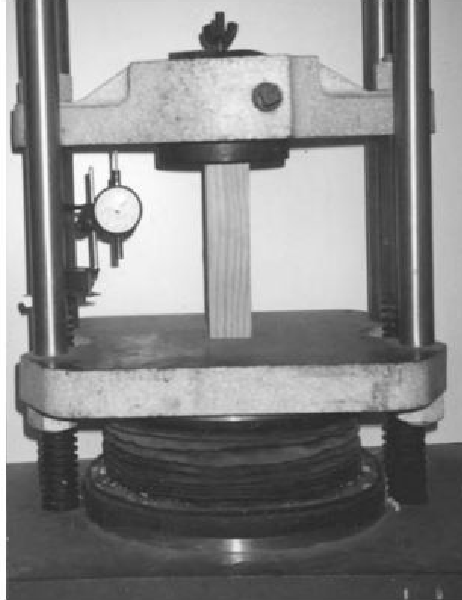


FIGURA 10.11 Ensayo de compresión paralela a la veta.

las de menor tamaño. Las lecturas relacionan la carga con la compresión hasta bastante más allá del límite de proporcionalidad. Las fracturas deben producirse en la parte central de la muestra. Si se producen cerca de los extremos, las muestras pueden apilarse de manera que los extremos se sequen con respecto al centro. Esto hará que se incremente la resistencia de los extremos de las muestras. A continuación se repiten los ensayos con las muestras así acondicionadas. El tipo de fractura puede clasificarse como aplastamiento, cuña, corte, partición, partición y corte, y astillado y deformación, como se ilustra en la Figura 10.12.

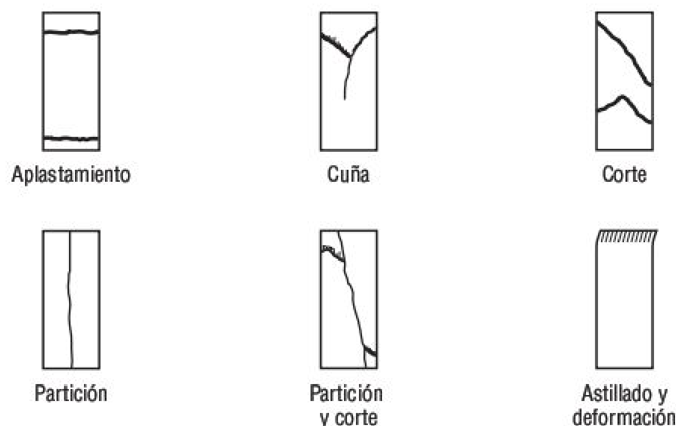


FIGURA 10.12 Tipos de fractura en el ensayo de compresión paralela a la veta (ASTM D143). Reimpreso con permiso de ASTM.

El ensayo de compresión perpendicular a la veta se realiza con probetas de 50 × 50 × 150 mm (2 × 2 × 6 pulgadas). La carga se aplica mediante una placa de soporte metálica de 50 mm (2 pulg.) de anchura, centrada sobre la superficie superior de la probeta. La carga se aplica a una velocidad de 0,305 mm/min. (0,012 pulg./min.). Las lecturas de la deflexión se aproximan al múltiplo más próximo de 0,002 mm (0,0001 pulg.). La carga y la deformación se miden hasta que la deformación es de 2,5 mm (0,1 pulg.).

10.10 Consideraciones de diseño

La medida de las propiedades de la madera en el laboratorio no refleja todos los factores que afectan al comportamiento del material en aplicaciones de ingeniería. Para el diseño de estructuras de madera, las propiedades de resistencia dadas en la Tabla 10.4 deben ajustarse para tener en cuenta factores como:

- Servicio en entornos húmedos.
- Temperatura.
- Estabilidad de las vigas.
- Tamaño.
- Volumen.
- Uso normal.
- Cargas repetidas.
- Curvatura.
- Forma.

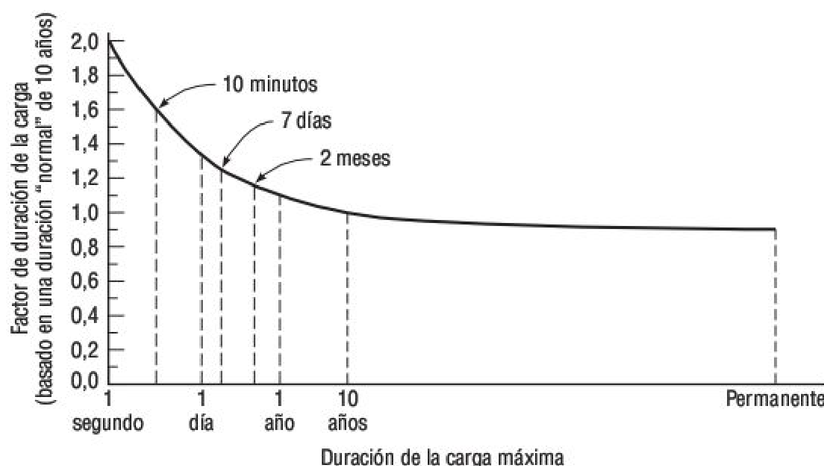


FIGURA 10.13 Factores de ajuste según la duración de la carga, para los esfuerzos calculados en los diseños de estructuras de madera basados en una duración nominal de 10 años. Reimpreso con permiso de la Asociación americana de industrias forestales y papeleras (American Forest and Paper Association), 2005.

- Estabilidad de los pilares.
- Esfuerzo cortante.
- Área de soporte.

Además, las cargas sostenidas provocan un efecto de reptación en la madera. En las aplicaciones de diseño, esto quiere decir que la madera puede soportar esfuerzos de corta duración mayores que los que puede soportar a largo plazo. Generalmente, para diseño se utiliza una duración de carga de 10 años. En la Figura 10.13 se muestra un ejemplo de ajuste de los factores de resistencia de acuerdo con la duración de las cargas (excepto para la compresión perpendicular a la veta). Por ejemplo, si se diseña una junta para un suelo de un escenario temporal, que solo se va a utilizar para una representación de un día de duración, teniendo en cuenta estos factores de corrección, el esfuerzo de flexión permitido podría incrementarse en un 33% con respecto al esfuerzo permitido en una aplicación normal.

10.11 Organismos que degradan la madera

La madera puede experimentar una degradación debido al ataque de hongos, bacterias, insectos u organismos marinos.

10.11.1 Hongos

La mayoría de las formas de descomposición y de manchas de savia son el resultado del crecimiento de hongos. Los hongos necesitan cuatro condiciones esenciales para poder existir: alimento, un rango apropiado de temperaturas, humedad y oxígeno. Los hongos se alimentan de la estructura de las células o del contenido de las células de las plantas leñosas, dependiendo del tipo de hongo. El rango de temperaturas que permite el crecimiento de los hongos está comprendido entre 5°C y 40°C (40°F y 100°F). Para que los hongos crezcan es necesario un grado de humedad por encima del punto de saturación de la fibra. Los hongos son plantas, y como tales, requieren oxígeno para la respiración. Los ataques de hongos producen *manchas* y/o *descomposición de la madera*.

Para protegerse frente al ataque de los hongos, es necesario eliminar alguna de las cuatro condiciones esenciales para su crecimiento. La medida de protección más efectiva consiste en mantener seca la madera utilizando algún tipo de recubrimiento o colocándola en el sitio correcto durante el almacenamiento y en la estructura final. Los hongos también pueden prevenirse tratando las fibras de madera con agentes químicos, mediante un proceso de tratamiento a presión.

Entre los procedimientos de construcción que reducen la descomposición de la madera en los edificios podemos citar:

1. Construir las estructuras con madera seca libre de muestras de descomposición incipiente y de una cantidad excesiva de manchas y otras señales.

2. Utilizar diseños que mantengan los componentes de la madera secos, empleando madera tratada con agentes preservantes.
3. Utilizar el duramen de especies resistentes a la descomposición en aquellas secciones que estén expuestas a condiciones que favorezcan la descomposición por encima del suelo.
4. Utilizar madera tratada a presión para aquellos componentes que estén en contacto con el suelo.

10.11.2 Bacterias

Las bacterias pueden provocar que la madera se humedezca y que el duramen se ennegrezca en los árboles vivos, así como una degradación general de la madera cortada. El primero de los dos problemas, el de la humectación de la madera, es una parte del tronco inundada de agua que ocupa el centro del tronco de los árboles vivos, y resulta más común en los chopos, sauces y olmos. El problema del ennegrecimiento del duramen tiene características similares a los de la humectación de la madera, además de provocar que el centro del tronco se vuelva de color marrón oscuro o negro.

El crecimiento de las bacterias suele favorecerse en ocasiones mediante un prolongado almacenamiento en contacto con el suelo. Este tipo de actividad bacteriana produce un reblandecimiento de las capas exteriores de la madera, que da lugar a una contracción excesiva cuando la madera vuelve a secarse.

10.11.3 Insectos

Los *escarabajos* y las *termitas* son los insectos que más comúnmente atacan a la madera. Son diversos los tipos de escarabajos que atacan y destruyen la madera cortada. El almacenamiento de los troncos en agua o un rociado de los mismos con agua evita que el escarabajo anide en la madera. El rápido secado o la rápida extracción de la corteza también impide los ataques de escarabajos. Los daños pueden prevenirse utilizando prácticas de apeo y de corte apropiadas y sumergiendo la madera en una solución química apropiada o rociándola con ella.

Las termitas son, tal vez, el más destructivo de los organismos que atacan a la madera. Los daños anuales atribuidos a las termitas exceden las pérdidas debidas al fuego. Las termitas pueden entrar en las estructuras de los edificios a través de la madera que esté próxima al suelo y que esté húmeda o no se encuentre adecuadamente ventilada. Pueden prevenirse los ataques de termitas pintando la madera o evitando que los insectos entren en las áreas de madera no protegida, utilizando algún tipo de recubrimiento o de componente sellante.

10.11.4 Organismos marinos

El daño provocado por organismos marinos suele deberse a los moluscos perforantes, a los foládidos y a especies como la *limnoria* yla *sphaeroma*. Estos organismos suelen estar confinados totalmente en aguas saladas o salobres.

10.12 Preservación de la madera

Los principales tipos de preservantes de la madera son las pinturas, las disoluciones basadas en petróleo y los óxidos hidrosolubles (sales). El grado de preservación alcanzado dependerá del tipo de preservante, del grado de penetración y de la cantidad de producto químico retenida dentro de la madera. Las pinturas se aplican sobre la superficie, mientras que los otros preservantes se aplican a presión para incrementar la penetración en la madera.

10.12.1 Disoluciones basadas en petróleo

Los principales preservantes basados en petróleo son la creosota de alquitrán de hulla, la creosota de petróleo, las disoluciones de creosota y las disoluciones de pentaclorofenol. Estos preservantes son muy efectivos, aunque afectan al medio ambiente. Suelen utilizarse cuando existe un alto grado de exposición medioambiental y el contacto humano no constituya un problema. Entre las aplicaciones podemos citar los postes para obras públicas, las traviesas de ferrocarril y los muros de contención.

10.12.2 Preservantes hidrosolubles

Los solutos típicos utilizados en las mezclas de preservantes hidrosolubles son el arseniato de cobre amoniacal, el arseniato de cobre cromado (CCA) y el arseniato de zinc cobre amoniacal. Las ventajas de los preservantes hidrosolubles basados en petróleo son su limpieza y la posibilidad de pintar luego la madera. La desventaja de estos tratamientos es que se eliminan por lisiviación cuando la madera se expone a condiciones de humedad durante periodos dilatados de tiempo. Estos preservantes también afectan en gran medida al medio ambiente y deben aplicarse en condiciones cuidadosamente controladas. El nivel de daño potencial para las personas debido al contacto con madera tratada a presión con CCA ha sido objeto de fuertes controversias. Las asociaciones e industrias del sector apoyan la utilización de ese tipo de productos, pero varias otras agencias gubernamentales han detectado efectos potencialmente perniciosos sobre la salud. En 2003, el sector industrial de preservación de la madera acordó dejar de utilizar preservantes basados en arsénico para productos pensados para uso residencial o que estuvieran en contacto directo con los seres humanos. El CCA puede seguir utilizándose para aplicaciones comerciales y para cimientos permanentes. Pero aunque el CCA se haya eliminado del mercado, la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) americana no ha solicitado que se elimine de las estructuras existentes.

Los preservantes de sustitución más comunes son el compuesto cuaternario de cobre amoniacal o ACQ, seguido del azol de cobre y el borato. El borato puede utilizarse en placas de solera para cimientos de casas y otras aplicaciones “en seco”, aunque la madera tratada con borato no es apropiada para uso exterior (Forintek, 2002).

10.12.3 Técnicas de aplicación

Los preservantes se aplican mediante tratamiento superficial o mediante procesos que obligan a la penetración de fluido en la madera. Entre las técnicas de tratamiento superficial se incluyen los recubrimientos aplicados mediante pintura, rociado o inmersión. La penetración de un líquido en un sólido poroso se produce por absorción capilar y es función de la tensión superficial, el ángulo de contacto, el tiempo, la temperatura y la presión.

La madera tratada a presión tiene una mayor resistencia a la degradación que la tratada superficialmente. Con el tratamiento a presión se fuerza al preservante a impregnar toda la estructura de la madera, tratando cuidadosamente toda la sección trasversal de la misma, lo que permite eliminar el peligro de descomposición durante un largo periodo de tiempo. Algunos fabricantes de madera tratada a presión proporcionan una garantía de por vida para sus productos, siempre y cuando estos estén en contacto directo con el suelo. La clave para garantizar una larga vida útil es la cantidad de preservante retenido en la madera. La Tabla 10.5 detalla los requisitos mínimos de retención para diferentes tratamientos y aplicaciones en maderas y contrachapados de pino de Elliot.

10.12.4 Precauciones de construcción

Hay unas cuantas cuestiones que deben tenerse en cuenta durante el diseño y construcción con materiales tratados a presión. Hay que tener cuidado de evitar inhalar el

TABLA 10.5 Requisitos mínimos de retención en kg/m^3 para distintos tratamientos y aplicaciones del contrachapado y la madera de pino de Elliot (Consejo regulador del Pino de Elliot, Southern Pine Council 1990).

		Por encima del suelo	Uso en suelo y con agua dulce	Cimiento permanente de madera	Uso con agua salada
Preservantes hidrosolubles	Arseniato de cobre amoniacal	4	6	10	41
	Arseniato de zinc cobre amoniacal	4	7	10	41
	Arseniato de cobre cromado	4	7	10	41
Creosota y preservantes solubles en petróleo	Creosota	131	163	NR*	408
	Creosota–petróleo	131	163	NR*	NR*
	Disoluciones de creosota	131	163	NR*	408
	Pentaclorofenol	7	8	NR*	NR*

*NR: No recomendado.

Para ver una lista completa de productos de madera, consulte la normas de la asociación americana AWPA (*American Wood Preservative Association*).

serrín durante el corte de la madera. Es preciso lavarse las manos después de manipular madera tratada a presión y antes de consumir ninguna bebida o producto alimenticio. Las ropas deben lavarse solas sin mezclar con ninguna otra ropa. Finalmente, el material de desecho debe eliminarse apropiadamente; no hay que quemarlo.

La madera tratada a presión favorece la corrosión de las perchas y los elementos de fijación. Generalmente, la galvanización era adecuada para proteger esos elementos. Sin embargo, existen ciertas pruebas de que los nuevos preservantes son todavía más corrosivos. Las velocidades más altas de corrosión del metal asociadas con la madera tratada con ACQ han hecho cundir la preocupación entre determinados organismos reguladores. Recientemente, la Comisión de seguridad de productos de consumo (CPSC, *Consumer Product Safety Commission*) americana emitió una alerta dirigida a los consumidores en este sentido (e-builder, 2005).

> "CPSC recomienda a los consumidores utilizar fijadores de acero inoxidable en conjunción con la madera tratada con ACQ", según el portavoz de la comisión Scott Wolfson. La CPSC está considerando si hace falta seguir estudiando el problema de la corrosión, basándose en la información proporcionada por el sector industrial de los conectores. El fiscal del distrito del Condado de Contra Costa ha advertido de que la madera tratada con ACQ y azol de cobre "puede provocar una corrosión grave y prematura..., especialmente si la madera está mojada o húmeda, a menos que se empleen conectores de acero inoxidable".

10.13 Productos de madera manufacturados

La madera manufacturada incluye una amplia variedad de productos que se fabrican uniendo tiras, chapas, virutas u otras formas de fibra de madera, con el fin de obtener una unidad de gran tamaño. Estos productos se diseñan para conseguir un comportamiento mecánico específico y coherente y presentan, por tanto, propiedades de diseño también coherentes. Existe una amplia variedad de productos manufacturados de madera que se producen para múltiples aplicaciones. Aquí solo consideraremos los productos empleados en aplicaciones estructurales.

Un producto manufacturado está compuesto de algún tipo de material de madera que se aglutina empleando una resina o adhesivo apropiado. Dado que predominantemente se usan materiales de madera, presentan los mismos problemas que los productos de madera natural, en lo que respecta a los efectos del fuego, la humedad y la descomposición. Los productos manufacturados de madera pueden estar compuestos de chapas, tiras o trozos de madera seca, como se muestra en la Tabla 10.6.

Los materiales basados en chapas están compuestos por chapas de madera que se pegan entre sí mediante algún tipo de adhesivo. Una chapa es una lámina fina de madera. Para obtener esas chapas, los troncos se saturan de agua almacenándolos en estanques, sometiéndolos a la acción del vapor o rociándolos con agua. Antes del procesamiento, los troncos se pasan por un baño de agua hirviendo. A continuación, se los descorteza y secciona para obtener la anchura deseada. Los segmentos se hacen rotar en una máquina de gran tamaño y se "pelan" para obtener láminas continuas de chapa

TABLA 10.6 Clasificación de los productos de madera manufacturados.

Material de origen	Clase de producto	
	Paneles/láminas estructurales (revestimientos, suelos)	**Formas estructurales (vigas, pilares, soportes)**
Chapas	Contrachapado.	Madera de chapa laminada.
Tiras	Aglomerado.	Madera de tiras orientada.
	Waferboard, orientación aleatoria de las tiras.	Madera de tiras laminadas.
	Tableros de tiras orientadas, tiras orientadas, paneles formados como chapas.	Madera de tiras paralelas (Parallam).
Compuesto	COM-PLY, núcleo de fibra de madera con exterior de chapa.	No aplicable.
Madera seca	No aplicable.	Madera laminada encolada (glulam).

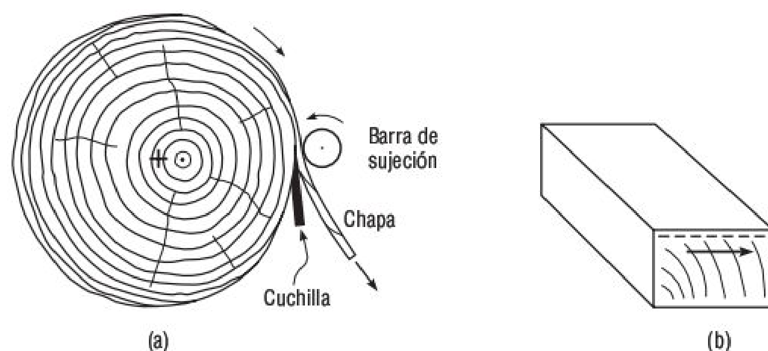


FIGURA 10.14 Corte de chapas para contrachapado y glulam: (a) corte rotatorio y (b) corte recto (© Pearson Education, Inc. Utilizado con su permiso).

como se muestra en la Figura 10.14. Estos segmentos de chapa se recortan y se juntan para formar un rollo continuo. Cada rollo de chapa se cura, secándolo hasta conseguir el grado de humedad deseado. Las chapas cortadas del rollo, se unen, se pegan y se prensan. En el contrachapado, las vetas de las distintas chapas se alternan 90°, mientras que en la madera de chapa laminada, por el contrario, se disponen de forma paralela. El contrachapado se fabrica en láminas planas, mientras que la chapa de madera laminada se suele fabricar con tamaños adecuados para elementos estructurales.

Las tiras tienen un espesor uniforme, con una longitud de hasta 150 mm (6 pulgadas) y una anchura de 25 mm (1 pulgada) para productos en panel, pudiéndose tener una longitud de hasta 600 mm (24 pulgadas) para formas estructurales. Las chapas o lá-

minas de tiras se fabrican encolando las tiras entre sí. Los paneles estructurales se forman encolando una serie de chapas así obtenidas en tres o cinco capas. Estos paneles caen en una clase general de materiales denominados aglomerados. Originalmente, las tiras tenían una orientación aleatoria, lo que producía un tipo de paneles denominados *waferboard*. En la década de 1970, la industria se dio cuenta de las ventajas que presentaba orientar las tiras antes de encolarlas y luego formar los paneles utilizando chapas con orientaciones alternativas de las tiras, lo que condujo al desarrollo de las maderas de tiras orientadas (OSB, *Oriented Strandboard*). Este es el producto de tiras que se usa de forma predominante actualmente en el mercado. Sus características estructurales se comparan favorablemente con las del contrachapado. Los tableros de tiras de madera también pueden usarse para formar elementos estructurales como vigas.

Los productos de madera seca (laminados) pueden encolarse para formar elementos estructurales utilizables en una amplia variedad de aplicaciones. Normalmente, se emplean especies como el pino de Elliot o el abeto de Douglas. Los tableros individuales se conocen como láminas, las cuales se encolan para formar el producto denominado glulam. Las láminas del pino de Elliot suelen ser de 35 mm (1 3/8 pulgadas), mientras que las de otras especies suelen ser de 38 mm (1 1/2 pulgadas). Las anchuras de los productos de glulam están típicamente comprendidas entre 63 y 275 mm (2 1/2 y 10 3/4 pulgadas), aunque pueden fabricarse elementos de prácticamente cualquier tamaño.

Los productos de madera manufacturados pueden clasificarse en sentido amplio como paneles/chapas estructurales o formas estructurales, como se muestra en la Tabla 10.6. Los paneles se utilizan principalmente como recubrimientos, mientras que las formas estructurales se emplean como vigas, pilares, etc. Los productos de chapa y los elementos estructurales pueden combinarse con el fin de fabricar diversos elementos estructurales compuestos, como vigas en I y secciones en T.

10.13.1 Paneles/chapas estructurales

Los productos de paneles estructurales incluyen los paneles de contrachapado, los tableros de tiras orientadas (OSB) y el COM-PLY. El contrachapado se fabrica como compuesto de láminas de chapa con una orientación alternativa de la veta. Los OSB se fabrican como un compuesto de tiras de madera; las maderas se orientan y se prensan para formar láminas. El panel ISB está compuesto por entre tres y cinco láminas encoladas con orientación alternativa de las tiras de madera. COM-PLY es un producto propietario fabricado con un núcleo de fibra de madera y un exterior de chapa. Los paneles pueden utilizarse directamente como revestimiento, para tejados, laterales y suelos. Los paneles de chapa se pueden cortar y unir a componentes estructurales, como por ejemplo vigas tubulares, chapas de forro y paneles estructurales aislados.

Los productos compuestos convencionales basados en madera se suelen fabricar con un adhesivo o resina termocurable que une entre sí las fibras de madera. Los adhesivos se seleccionan basándose en su adecuación a cada producto concreto. Los factores que deben considerarse son los materiales que haya unir, el grado de humedad en el momento de la unión, las propiedades mecánicas, la durabilidad y el coste (USDA-

FS, 1999). Entre los aglutinantes de resina más comúnmente utilizados para paneles poder citar los siguientes:

Fenol–formaldehído (PF) Utilizado para materiales diseñados para exposición en el exterior, incluyendo contrachapados y OSB.

Urea–formaldehído (UF) Se suele emplear para productos manufacturados en los que sea de importancia primordial la uniformidad dimensional y la suavidad de la superficie, como por ejemplo en tableros de partículas y tableros de fibra de densidad media diseñados para aplicaciones en interiores.

Melamina–formaldehído (MF) Se usa para láminas decorativas, tratamiento de papel y recubrimiento con papel.

Isocianato Se utiliza en forma de di-isocianato difenilmetano, empleándose comúnmente para OSB. Es altamente tóxico durante el proceso de fabricación.

Se espera que los sistemas UF y PF continúen siendo los adhesivos de madera dominantes, a menos que su uso se restrinja debido a las preocupaciones acerca de los riesgos asociados a los productos con formaldehído, o a las interrupciones del suministro o fabricación del material. En la actualidad, se desarrollan diversas investigaciones con el fin de diseñar adhesivos procedentes de fuentes renovables.

En España, AENOR publica diversas normas relativas a los adhesivos empleados en y con la madera.

Las propiedades mecánicas del contrachapado se clasifican basándose en la orientación del eje de resistencia respecto a la orientación de los soportes, como se muestra en la Figura 10.15 (Williamson, 2002). Las diferencias en las propiedades de resistencia se deben a la orientación de las vetas en las capas de contrachapado. En el OSB existen capas similares; sin embargo, esas capas no están ni definidas ni especificadas. Las propiedades mecánicas de los paneles estructurales se clasifican basándose en la orientación de la carga, como se muestra en la Figura 10.16, y en otros diversos factores

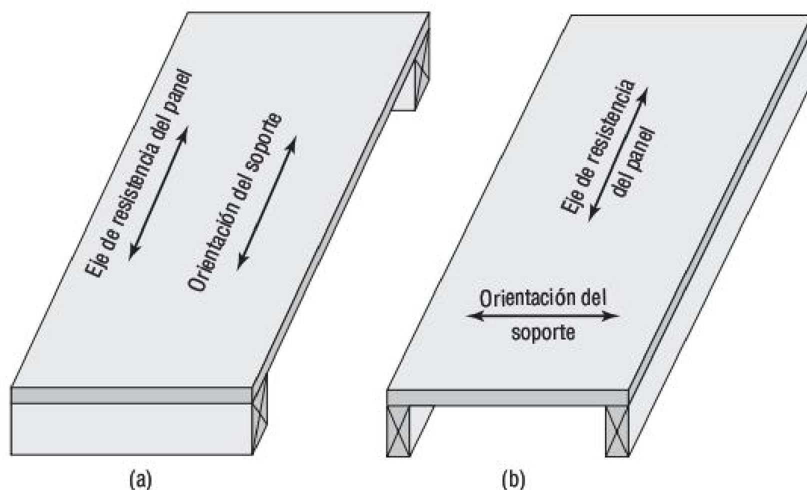


FIGURA 10.15 Eje de resistencia del contrachapado.

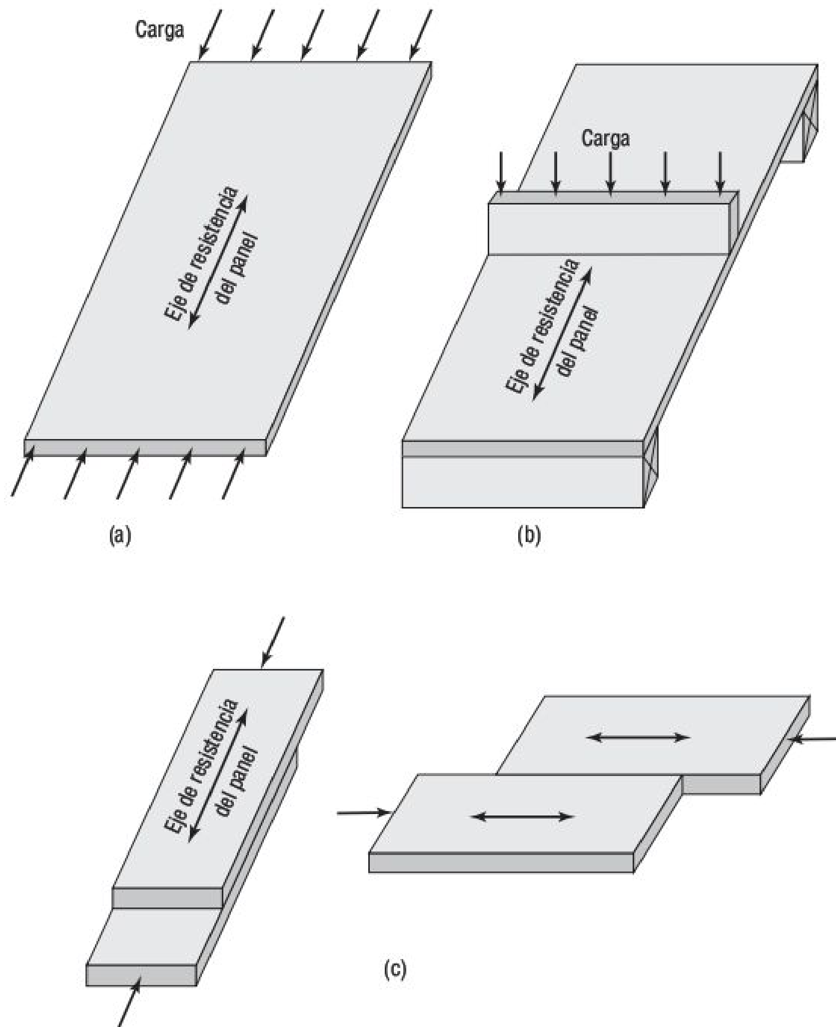


FIGURA 10.16 Condiciones de orientación de la carga para determinar las propiedades mecánicas del contrachapado.

(Williamson, 2002). La Tabla 10.7 resume las propiedades mecánicas del contrachapado y del OSB utilizados en aplicaciones de recubrimiento de estructuras (USDA-FS, 1999). Al igual que sucede con los productos de madera natural, en el diseño hay que considerar diversos factores de ajuste a la hora de seleccionar un panel estructural para una aplicación específica.

10.13.2 Formas estructurales

Para fabricar formas estructurales se emplean tres productos de madera manufacturados, basándose en el tipo de madera original: chapa laminada, tiras y madera laminada encolada. Los productos laminados y de tiras se designan con el nombre de maderas es-

TABLA 10.7 Propiedades generales del contrachapado y del OSB en las aplicaciones de revestimiento estructural.

Propiedad	Contrachapado	OSB	Método de prueba ASTM
Expansión higroscópica lineal (30–90%), %	0,15	0,15	
Expansión térmica lineal pulg./pulg./F	$3,4 \times 10^{-6}$	$3,4 \times 10^{-6}$	
Flexión—módulo de fractura, psi	3.000–7.000	3.000–4.000	D 3043
Flexión—módulo de elasticidad, psi	$1,0–1,9 \times 10^{-6}$	700–1.200	
Resistencia a la tracción, psi	1.500–4.000	1.000–1.500	D 3500
Resistencia a la compresión, psi	3.000–5.000	1.500–2.500	D 3501
Cortante a través del espesor—resistencia, psi	600–1.100	1.000–1.500	D 2719
Cortante a través del espesor—módulo, psi	$68–110 \times 10^{3}$	$180–290 \times 10^{3}$	D 3044
Cortante en plano de las chapas—resistencia, psi	250–300	200–300	D 2718
Cortante en plano de las chapas—módulo, psi	$20–30 \times 10^{3}$	$20–50 \times 10^{3}$	D 2718

tructurales compuestas (SCL, *Structural Composite Lumber*). Todos los tipos de productos SCL pueden utilizarse en lugar de la madera aserrada en muchas aplicaciones. La madera de chapas laminadas (LVL, *Laminated Veneer Lumber*) se emplea para andamiajes y cabezas de vigas en I prefabricadas. Tanto la LVL como la madera de tiras paralelas (PSL, *Parallel Strand Lumber*) se utilizan para soportes y otros elementos sometidos a cargas grandes. Los productos basados en tiras de madera se usan para vigas perimetrales en construcción de suelos y como sustitutos de vigas y costillas en la construcción de paredes y techos (USDA-FS, 1999).

Madera de chapa laminada (LVL) Fue desarrollada en la década de 1940 para fabricar elementos de alta resistencia para aeronaves. Actualmente, es un material de construcción de gran aceptación. Las chapas, con un espesor de 2,5 mm a 3,2 mm (1/10 pulg. a 1/8 pulg.) se encolan con adhesivo de fenol–formaldehído para formar tableros, que tienen entre 0,6 m y 1,2 m (2 a 4 pies) de anchura por 38 mm (1,5 pulgadas) de espesor. Las chapas de alinean con la veta paralela a la longitud del elemento. La unión terminal entre chapas se realiza de forma intercalada o solapada, para minimizar los efectos de reducción de la resistencia. Se emplean prensas continuas para fabricar chapas con una longitud que solo está limitada por la capacidad de manejarlas. Alternativamente, las chapas pueden fabricarse con longitudes de 2,4 m (8 pies) y unirse mediante empalmes biselados o empalmes en cola de pescado, para obtener piezas de mayor longitud.

La chapa utilizada para fabricar LVL debe seleccionarse cuidadosamente, para que tenga la adecuada uniformidad. Puede emplearse una clasificación visual, aunque normalmente se emplean ensayos ultrasónicos para identificar y clasificar las chapas aceptables. Los ensayos ultrasónicos permiten detectar rápidamente los fallos presentes en la chapa, como por ejemplo nudos y fendas, que puedan limitar la resistencia del producto acabado. Puesto que la calidad de cada capa de la chapa está controlada, las variaciones en las propiedades del producto son menores que en los productos de madera naturales.

La LVL se fabrica para satisfacer ciertos requisitos específicos de clasificación de la resistencia. Debido a la construcción del contrachapado, es necesario tener en cuenta la orientación del elemento y de la carga en el momento de seleccionar las propiedades. La Figura 10.17 identifica la terminología común utilizada para describir las condiciones de carga para pruebas y para diseño. La Tabla 10.8 es una parte de la tabla de propiedades de diseño de la norma de comportamiento APA-EWS PRL-501, que cubre las propiedades necesarias para la madera LVL clasificada en función de su resistencia (APA-EWS, 2000). Las notas a pie de página incluidas en la tabla explican la información contenida en la misma; por tanto, debe consultarse la referencia citada antes de utilizar esta información en un diseño. Las notas al pie hacen referencia a modificaciones de los valores de diseño en función de las condiciones de carga y de la duración de la misma. Es preciso observar que los valores de la Tabla 10.8 son para el diseño, tratándose por tanto de valores conservadores. La Tabla 10.9 proporciona valores de ensayo característicos, que son mucho más altos que los valores de diseño para todas las propiedades excepto para el módulo elástico en flexión.

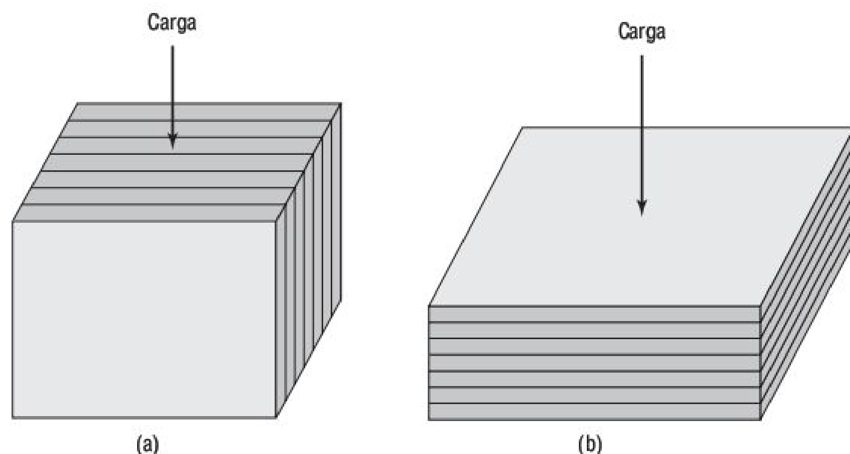


FIGURA 10.17 Convenio de eje utilizado para definir las condiciones de carga para la madera de chapas laminadas.

Madera de tiras paralelas y orientadas Al igual que sucede con los tableros OSB, las tiras de madera pueden encolarse para formar elementos estructurales. Dependiendo de la longitud de las tiras y del grado de orientación, los productos se clasifican como madera de tiras paralelas, madera de tiras laminada o madera de tiras orientadas.

La madera de tiras paralelas es un compuesto de tiras de madera, en las que las tiras de madera están orientadas principalmente a lo largo de la longitud del elemento. La dimensión más pequeña de las tiras debe ser inferior a 6,4 mm (0,25 pulgadas) y la longitud media de las tiras debe ser 150 veces la dimensión más pequeña. Típicamente, las tiras tienen un espesor de 3 mm (0,125 pulgadas), una anchura de 19 mm (0,75 pulgadas) y una longitud de 0,6 m (24 pulgadas). Para unir las tiras se emplea un adhesivo estructural impermeabilizante, como el fenol–resorcinol–formaldehído. Las tiras se

TABLA 10.8 Propiedades de diseño para la madera LVL con clasificación de comportamiento APA-EWS (APA-EWS, 2000)

Clase APA-EWS	Módulo de flexión (10^6 psi)	Esfuerzo máximo permisible de la fibra (psi)	Esfuerzo de tracción permisible paralelo a la veta (psi)	Esfuerzo de compresión paralelo a la veta (psi)	Esfuerzo cortante de borde (psi)	Esfuerzo de compresión perpendicular a la veta (psi)
1.5E-2250F	1,5	2.250	1.500	1.950	220	575
1.8E-2600F	1,8	2.600	1.700	5.400	285	700
1.9E-2600F	1,9	2.600	1.700	2.550	285	700
2.0F-2900F	2,0	2.900	1.900	2.750	285	750
2.1E-3100F	2,1	3.100	2.200	3.000	285	850

TABLA 10.9 Valores de ensayo característicos para la madera LVL con clasificación APA-EWS (APA-EWS, 2000)

Clase APA-EWS	Módulo de flexión (10^6 psi)	Esfuerzo máximo permisible de la fibra (psi)	Esfuerzo de tracción permisible paralelo a la veta (psi)	Esfuerzo de compresión paralelo a la veta (psi)	Esfuerzo cortante de borde (psi)	Esfuerzo de compresión perpendicular a la veta (psi)
1.5E-2250F	1,5	4.725	3.150	3.705	695	960
1.8E-2600F	1,8	5.460	3.570	4.560	900	1.170
1.9E-2600F	1,9	5.460	3.570	4.845	900	1.170
2.0F-2900F	2,0	5.460	3.990	5.225	900	1.255
2.1E-3100F	2,1	5.460	4.620	5.700	900	1.420

orientan cuidadosamente, se recubren con adhesivo y se hacen pasar por una prensa continua para obtener una alta densidad, produciéndose tableros que normalmente tienen un tamaño de 0,28 m por 0,48 m (11 por 19 pulgadas). La longitud de los tableros se ve limitada por la capacidad de manejo de los mismos. Los tableros se recortan para obtener las dimensiones adecuadas (USDA-FS, 1999).

Actualmente, la madera de tiras paralelas es un material propietario con un único productor y se comercializa con el nombre de Parallam (Trusjoist, 2003). La Tabla 10.10 detalla las propiedades de diseño mecánicas de este producto, tal y como las describe el fabricante.

La madera de tiras laminada (LSL) y la madera de tiras orientadas (OSL) son extensiones de la tecnología utilizada para producir tableros de tiras orientadas. Se fabrican utilizando procesos similares, radicando la principal diferencia en la longitud de las

TABLA 10.10 Propiedades mecánicas de la madera de tiras paralelas y laminada (Trusjoist).

Propiedad	Madera de tiras paralelas	Madera de tiras laminada
Módulo cortante de elasticidad (psi)	125.000	
Módulo de elasticidad (psi)	$2{,}0 \times 10^6$	$1{,}5 \times 10^6$
Resistencia a la flexión (psi)	2.900	2.250
Resistencia a la tracción (psi)	2.025	
Compresión perpendicular a la veta (psi)	750	475
Compresión paralela a la veta (psi)	2.900	1.950
Cortante horizontal paralela a la veta (psi)	290	400

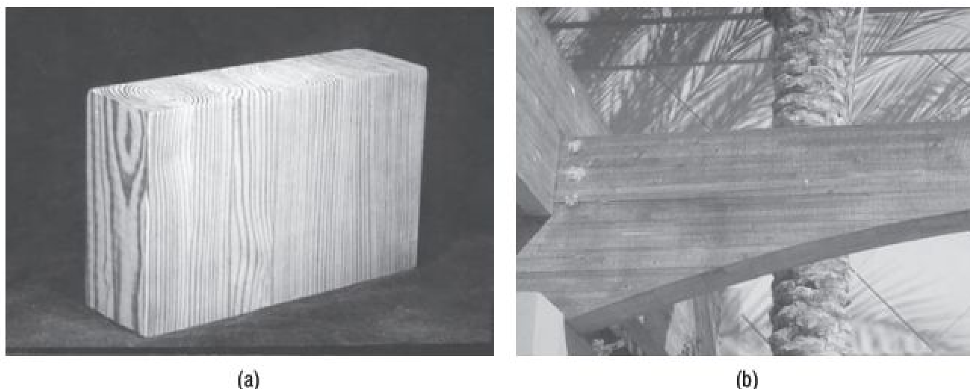
tiras: aproximadamente 300 mm (12 pulgadas) y 150 mm (6 pulgadas) para LSL y OSL, respectivamente. Como se muestra en la Tabla 10.10, las propiedades mecánicas de la madera LSL son algo menores que las de la madera PSL. Las propiedades mecánicas de la madera OSL son menores que las de la LSL (USDA-FS, 1999).

Madera laminada encolada. Las maderas laminadas están compuestas por dos o más capas de madera encoladas, estando dispuestas de forma paralela las vetas en todas las capas. Puede utilizarse prácticamente cualquier especie de árbol, siempre que sus propiedades mecánicas y físicas resulten adecuadas para los requisitos de diseño. Sin embargo, habitualmente, para la fabricación de madera estructural laminada se emplea madera de coníferas, como la del abeto de Douglas o el pino de Elliot.

La madera laminada–encolada, comúnmente denominada "glulam", se utiliza para vigas y pilares estructurales, muebles, equipos deportivos y acabados decorativos en madera, como se muestra en la Figura 10.18. En tales casos, la madera laminada encolada resulta preferible frente a la utilización de elementos de madera maciza, por muchas razones, entre las que se incluyen las siguientes:

- Facilidad de fabricar elementos estructurales de gran tamaño a partir de maderas de tamaño comercial.
- La oportunidad de diseñar elementos de gran tamaño cuya sección transversal sea distinta en diferentes puntos, según requiera la aplicación.
- Diseño especializado para satisfacer los requisitos estéticos del arquitecto.
- Oportunidad de utilizar calidades de madera inferiores en las áreas del elemento sometidas a menor tensión.
- Minimización de las fendas y de otros defectos del curado asociados con la curación de elementos macizos de gran tamaño.

La unión de las láminas de los elementos es una de las etapas críticas en la fabricación de estas maderas. Las láminas se pulen con una tolerancia muy estricta antes del encolado, para garantizar que el producto final sea rectangular y que la presión se aplique homogéneamente. A las caras que hay que encolar se les aplica un adhesivo



(a) (b)

FIGURA 10.18 Ejemplos de madera laminada-encolada.

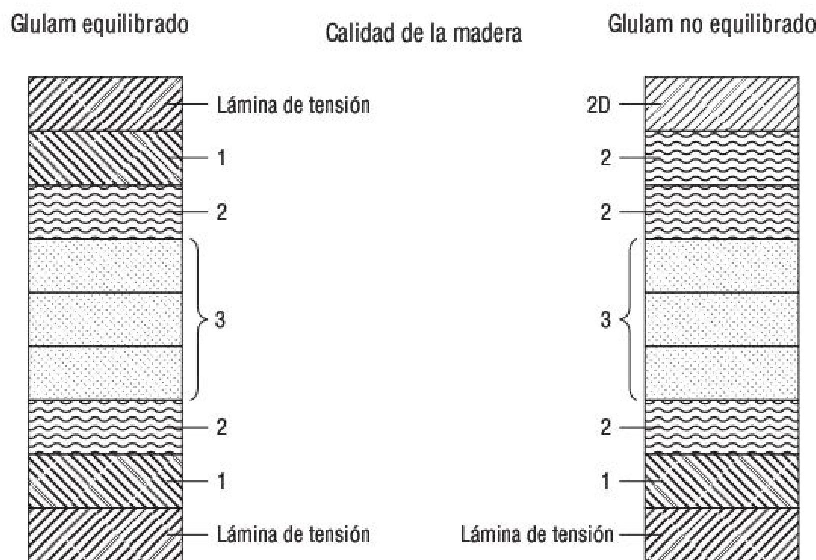


FIGURA 10.19 Fabricación de productos glulam equilibrados y no equilibrados.

aprobado, normalmente fenol–resorcinol. Las láminas se unen y se fijan mientras que el adhesivo cura. El adhesivo se deja curar a temperatura ambiente entre 6 y 24 horas, o en algunos procesos de fabricación, se emplea una curación por radiofrecuencia para reducir el tiempo a unos pocos minutos (USDA-FS, 1999).

La madera laminada–encolada se diseña y se fabrica para obtener propiedades coherentes y uniformes. Debido a la estructura laminada, el glulam puede fabricarse para optimizar el uso de los productos de madera. Por ejemplo, los productos de glulam diseñados como elementos de flexión se fabrican incluyendo la madera de mayor calidad en los extremos de la viga y la madera de menor calidad en el centro, como se ilustra en la Figura 10.19. Los elementos de flexión utilizados para vigas voladizas o los elementos continuos dispuestos sobre varios vanos tienen una estructura equilibrada, dado que tanto la parte superior como la inferior de la viga deben soportar cargas de tracción. Sin embargo, los productos de glulam diseñados para vanos simples, que están pensados para presentar solo tracción en la parte inferior y compresión en la parte superior de la viga, tienen diseños no equilibrados, encontrándose la madera de mayor calidad en la parte inferior del elemento. Este es un diseño no equilibrado y estos elementos deben etiquetarse cuidadosamente para evitar el riesgo de que la viga se instale con la orientación incorrecta.

Los productos de glulam se fabrican con distintos tipos de acabado según la aplicación a la que vayan a ser destinados. Esta clasificación según la apariencia del producto no modifica los valores de diseño, la calidad de la madera utilizada ni otras normas que gobiernan la fabricación o el uso de la madera laminada encolada.

Los productos de glulam se clasifican según el esfuerzo que pueden soportar, basándose en unos valores mínimos de su resistencia a la flexión y del módulo de elasti-

cidad, como se muestra en la Tabla 10.11 (APA-EWS, 2004). Los valores de diseño de esta tabla corresponden a elementos con cuatro o más láminas. La clasificación en función de la resistencia no designa las especies utilizadas e indica si la madera de las láminas debe clasificarse visualmente o según su resistencia. Las especies pueden especificarse en combinación con estos niveles de resistencia para obtener las propiedades de diseño requeridas. La presencia de una clasificación en función de la resistencia no significa que el material esté disponible. Además, pueden obtenerse valores de diseño superiores para algunas propiedades especificando una combinación concreta de láminas. La Tabla 10.12 presenta una lista parcial de esfuerzos de diseño admisibles para productos de glulam, con cuatro o más láminas, usados como elementos

TABLA 10.11 Clasificación de productos de glulam según el nivel de esfuerzo (APA-EWS, 2004).

	Máximo en flexión				
Clase	Zona de tracción soportando tracción (psi)	Zona de compresión soportando tracción[1], (psi)	Compresión perpendicular a la veta (psi)	Cortante paralela a la veta[3] (psi)	Módulo de elasticidad (10^6 psi)
16F-1.3E	1.600	925	315	195	1,3
20F-1.5E	2.000	1.100	425	210	1,5[5]
24F-1.7E	2.400	1.450	500	210	1,7
24F-1.8E	2.400	1.450[2]	650	265[4]	1,8
26F-1.8E	2.600	1.950	650	265[4]	1,9
28F-1.8E	2.800	2.300	740	300	2,1[6]
30F-2.1E SP[7]	3.000	2.400	740	300	2,1[6]
30F-2.1E LVL[8]	3.000	3.000	510[9]	300	2,1

Notas:

[1]Para estructuras de las láminas equilibradas, el esfuerzo de flexión cuando la zona de compresión se somete a tracción debe ser igual al esfuerzo de flexión cuando la zona de tracción se somete a tracción. El diseñador debe especificar si hace falta emplear una estructura equilibrada.

[2]Puede incrementarse el esfuerzo de flexión negativo en 1850 psi para el abeto de Douglas y en 1950 para el pino de Elliot, para combinaciones específicas. El diseñador debe especificar si son necesarios estos esfuerzos incrementados.

[3]Para elementos no prismáticos, elementos con muescas y elementos sujetos a cargas de impacto o cíclicas, el valor de diseño para la cortante debe multiplicarse por un factor de 0,72.

[4]Cortante paralela a la veta (horizontal) = 300 psi para glulam fabricado con pino de Elliot.

[5]El módulo de elasticidad puede incrementarse a $1,8 \times 10^6$ psi para el glulam fabricado con piceas, abetos y pinos de Canadá y piceas rojas.

[6]Módulo de elasticidad = $2,0 \times 10^6$ psi para elementos con más de 15 láminas, excepto para el glulam LVL híbrido 30F.

[7]Limitado a un máximo de seis pulgadas, excepto para el glulam LVL híbrido.

[8]Requiere el uso de una lámina LVL externa en la parte superior y en la inferior.

[9]La resistencia a la compresión perpendicular a la veta puede incrementarse hasta el valor publicado para la lámina LVL más externa.

de flexión y que son fabricados comúnmente por miembros de la APA-EWS. Las especies de madera mencionadas en esta tabla son:

ES: Picea roja
DF: Abeto de Douglas
SP: Pino de Elliot

Hay que observar que esta tabla incluye muchas notas al pie, por lo que antes de utilizar esta información, el lector deberá consultar la referencia citada (APA-EWS, 2004). La Tabla 10.12 muestra los valores de diseño solo para los elementos de flexión. En la referencia citada hay disponible una tabla similar para los elementos sometidos a tracción o compresión axial.

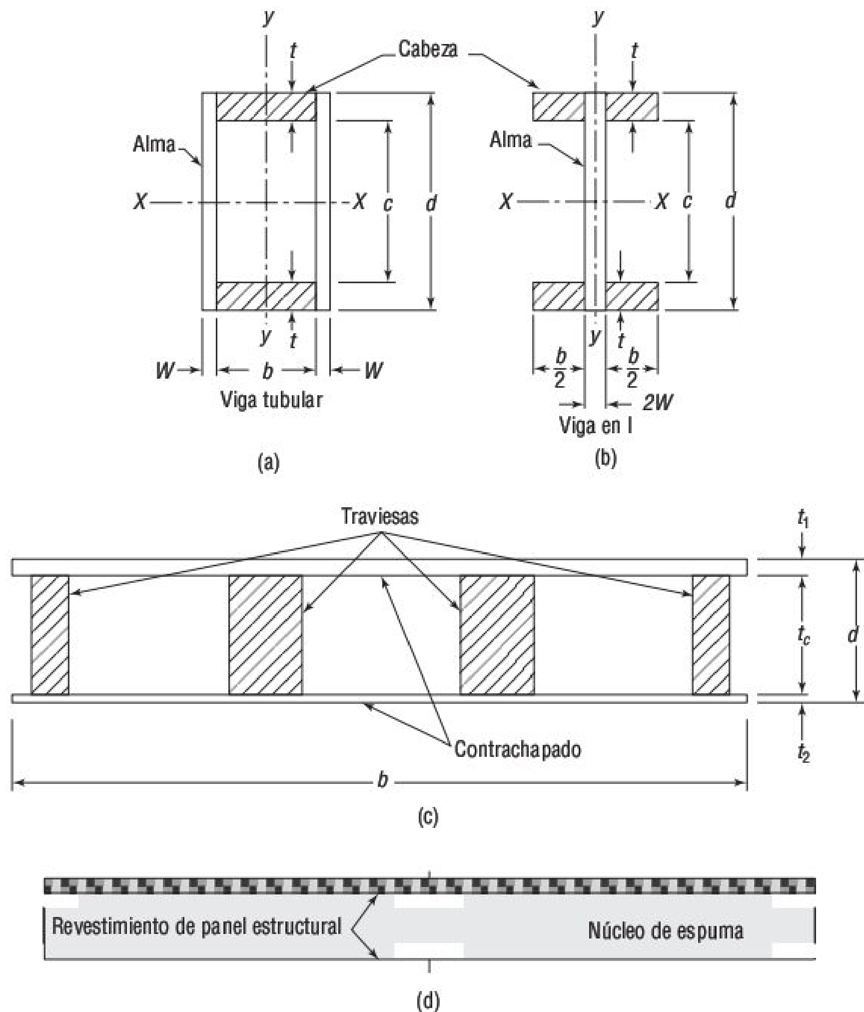


FIGURA 10.20 Elementos estructurales compuestos: (a) viga tubular, (b) viga en I, (c) chapas de forro y (d) paneles estructurales aislados.

TABLA 10.12 Propiedades de los valores de diseño para productos glulam seleccionados fabricados por los miembros de APA-EWS (APA-EWS, 2004).

			Flexión (carga perpendicular a la cara ancha de las láminas)					
			Máximo de flexión		Compresión perpendicular a la veta		Cortante paralela a la veta	Módulo de elasticidad
			Zona de tracción sometida a tracción	Zona de compresión sometida a tracción	Cara de tracción	Cara de compresión		
Símbolo combinado	Especies exterior/ núcleo	Equilibrado/ no equilibrado	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(10^6 psi)
Otras especies								
EWS 20F-E/ES1	ES/ES	E	2000	2000	560	560	200	1,8
EWS 24F-E/ES1	ES/ES	N	2400	1700	560	560	200	1,7
EWS 24F-V4	DF/DF	N	2400	1850	650	650	265	1,8
EWS 24F-V8	DF/DF	E	2400	2400	650	650	265	1,8
Pino de Elliot								
EWS 24F-V3	SP/SP	N	2400	1950	740	740	300	1,8
EWS 24F-V5	SP/SP	E	2400	2400	740	740	300	1,7

TABLA 10.12 (Continuación)

	Flexión (carga perpendicular a la cara ancha de las láminas)				Carga axial		
	Máximo de flexión	Compresión perpendicular a la veta	Cortante paralela a la veta	Módulo de elasticidad	Tracción paralela a la veta	Compresión paralela a la veta	Módulo de elasticidad
Símbolo combinado	(psi)	(psi)	(psi)	(10^6 psi)	(psi)	(psi)	(10^6 psi)
Otras especies							
EWS 20F-E/ES1	1100	300	175	1,5	1050	1150	1,6
EWS 24F-E/ES1	1100	300	175	1,5	1050	1150	1,6
EWS 24F-V4	1450	560	230	1,6	1100	1650	1,7
EWS 24F-V8	1450	560	230	1,6	1100	1650	1,7
Pino de Elliot							
EWS 24F-V3	1750	650	265	1,6	1150	1650	1,7
EWS 24F-V5	1750	650	265	1,5	1150	1650	1,6

10.13.3 Elementos estructurales compuestos

Al igual que sucede con los productos de madera naturales, los productos encolados pueden combinarse de diversas formas para fabricar elementos estructurales. Como ejemplos típicos de elementos compuestos manufacturados (Figura 10.20) podemos citar:

Vigas en I

Vigas tubulares

Chapas de forro

Paneles estructurales aislados

Por ejemplo, las vigas en I se fabrican encolando los elementos de cabeza a un alma formada por un tablero de tiras orientadas, como se muestra en la Figura 10.20(b). Los elementos de cabeza pueden ser de madera natural, o más comúnmente, de madera de chapa laminada.

Como productos manufacturados que son, las propiedades de los elementos suelen especificarse basándose en el comportamiento del elemento, en lugar de en los componentes individuales del material. Por ejemplo, las vigas en I se especifican en función del espaciado y la profundidad del elemento. Existen diversos organismos que desarrollan normas nacionales relativas a los elementos estructurales compuestos, como por ejemplo ASTM a nivel internacional o AENOR en España.

RESUMEN

La madera es un material de construcción extremadamente flexible. Históricamente, los productos de madera natural eran la única opción disponible para el ingeniero. Sin embargo, las prácticas de sivicultura modernas limitan el tamaño de los productos naturales disponibles. La necesidad de incrementar la eficiencia del uso de productos de madera ha conducido al desarrollo de productos de madera manufacturados. Estos productos, habitualmente resultan más económicos que los de madera natural, particularmente cuando es necesario emplear elementos de grandes dimensiones. Además, controlando cuidadosamente el proceso de fabricación, puede producirse madera manufacturada con características superiores a las de la madera natural. Las características de los productos de madera manufacturada dependen del material original utilizado, de la calidad del adhesivo y del proceso de fabricación. Hay varios factores que hacen de la madera un producto único, cuando se compara con otros materiales empleados en ingeniería civil; entre esos factores podemos citar la anisotropía, la sensibilidad a la humedad, la reptación y la existencia de defectos en los productos de madera. Además, cuando la madera se expone al entorno, hay que tener cuidado para impedir la degradación debida a los hongos, las bacterias y los insectos.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

10.1 ¿Cuáles son las dos clases principales de madera? ¿Cuál es el uso principal de cada una de esas clases? Indique los nombres de dos especies de árbol de cada clase.

10.2 ¿Cuál es la diferencia entre madera temprana y madera tardía? Describa ambos tipos de madera.

10.3 Un ensayo de laboratorio simple para determinar la gravedad específica de dos muestras de madera indica que para la muestra A, $G = 1{,}12$ y para la muestra B $G = 1{,}03$. Basándose únicamente en esta información, ¿qué muestra de madera seleccionaría para su proyecto de construcción como elemento estructural? Explique brevemente la razón.

10.4 Explique la naturaleza anisotrópica de la madera. ¿Cómo afecta este fenómeno al comportamiento de la madera?

10.5 Describa brevemente la composición química de la madera.

10.6 Se realiza un ensayo para determinar el grado de humedad de la madera de acuerdo con el procedimiento ASTM D4442, obteniéndose los siguientes datos:

Peso de la probeta en verde = 266,7 g
Peso de la probeta secada al horno $G = 152{,}1$ g
Calcule el grado de humedad de la probeta de madera dada.

10.7 ¿Qué es el punto de saturación de la fibra? ¿Cuál es el efecto del punto de saturación de la fibra sobre la contracción de la madera en las distintas direcciones? ¿Cómo afecta este fenómeno a las propiedades de la madera?

10.8 Un elemento de madera tiene unas dimensiones de 38,1 mm × 88,9 mm × 2,438 metros y un grado de humedad del 150% en el momento de ser preparado. Después del curado, el grado de humedad se reduce al 7%. Si las direcciones tangencial, radial y longitudinal de las vetas son del mismo orden que las dimensiones indicadas anteriormente, ¿cuáles serán las dimensiones del elemento curado si la relación de contracción por la humedad sigue el patrón mostrado en la Figura 10.5?

10.9 Un elemento de madera con un diámetro de 1 pulgada tiene un grado de humedad del 5%. El punto de saturación de la fibra (FSP) para esta madera es del 28%. La madera se contrae o se hincha un 1% en la dirección radial por cada 5% de variación en el grado de humedad por debajo del FSP.

a. ¿Cuál será el porcentaje de variación en el diámetro de la madera si se incrementa el grado de humedad de la misma hasta el 43%?
b. ¿La madera se contraerá o se hinchará?
c. ¿Cuál será el nuevo diámetro?

10.10 La madera se corta en las serrerías para obtener diversos productos con diferentes tamaños y formas, que serán emplados en aplicaciones de ingeniería. ¿Cómo se denomina a estos productos?

10.11 La madera de construcción puede cortarse del árbol aplicando uno de dos métodos o una combinación de los mismos. Enumere esos dos métodos y haga un croquis de cada uno de ellos. ¿Cuál es la principal ventaja de cada método?

10.12 ¿Por qué las dimensiones reales de la madera son diferentes de las dimensiones nominales? Explique su respuesta.

10.13 ¿Qué factores se tienen en cuenta a la hora de clasificar la madera? ¿Cuáles son las principales calidades de clasificación de las maderas de frondosas y de coníferas?

10.14 Enumere cinco imperfecciones diferentes que pueden encontrarse en la madera y defínalas brevemente.

10.15 Dibuje una curva curva esfuerzo–deformación típica para la madera. En la gráfica, indique el módulo de elasticidad.

10.16 Calcule el módulo de elasticidad de la especie de madera cuya relación esfuerzo–deformación se muestra en la Figura 10.9, utilizando tanto el SI como las unidades inglesas. Compare los resultados con los valores detallados en la Tabla 1.1 y comente los resultados.

10.17 Cite cinco ensayos distintos usados para evaluar las propiedades mecánicas de la madera.

10.18 Una probeta de madera se somete a una prueba de flexión hasta fractura aplicando una carga en mitad del vano. La probeta tiene una sección transversal de 1×1 pulgadas y un vano de 14 pulgadas. La carga y el grado de deflexión en la mitad del vano se registran durante el ensayo, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla P10.18.

a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación carga–deflexión.
b. Indique el límite de proporcionalidad en la gráfica.
c. Calcule el módulo de fractura (resistencia a la flexión).

10.19 Una probeta de madera que tiene una sección transversal cuadrada de 2×2 pulgadas se somete a un ensayo de flexión, aplicando una carga en mitad del vano, siendo la longitud de este de 28 pulgadas. Se mide la deflexión para diferentes niveles de carga, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla P10.19.

a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación carga–deflexión.
b. Señale el límite de proporcionalidad sobre la gráfica.
c. Calcule el módulo de fractura (resistencia a la flexión).
d. ¿Representa el módulo de fractura calculado en el apartado (c) los esfuerzos máximos de la probeta? Indique las suposiciones que haya hecho para calcular el módulo de fractura y la respuesta real de la probeta de madera.

10.20 Se prepara una probeta de madera cuyas dimensiones reales son $1\times 1\times 4$ pulgadas, siendo la veta paralela a su longitud. La probeta se somete a un ensayo de

compresión paralela a la veta hasta fractura. En la Tabla P10.20 se muestran los resultados de la relación carga–deformación.

Tabla P10.18

Carga (libras)	Deflexión (pulgadas)
0	0
8	0,149
16	0,227
28	0,295
60	0,365
111	0,404
156	0,437
198	0,468
243	0,502
286	0,537
328	0,581
365	0,616

Tabla P10.19

Carga (libras)	Deflexión (10^{-3} pulgadas)
0	0
100	27,9
200	55,6
300	83,2
400	111,2
500	140,0
600	166,7
700	194,3
800	222,2
900	250,1
1000	275,4
1100	314,8
1200	359,5
1300	405,0
1400	468,6 (fractura)

Tabla P10.20

Carga (libras)	Desplazamiento (pulgadas)
0	0
7	0,012
10	0,068
87	0,164
530	0,180
1705	0,208
2864	0,236
3790	0,268
4606	0,300
5338	0,324
5116	0,360
4468	0,384
4331	0,413

a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación esfuerzo–deformación.
b. Calcule el módulo de elasticidad.
c. ¿Cuál es el esfuerzo de fractura?

10.21 Se prepara una probeta de madera de pino de dimensiones 50 × 50 × 200 mm, siendo la veta paralela a su longitud. La prueba se somete a una prueba de compresión paralela a la veta hasta fractura. Los resultados de carga–deformación son los mostrados en la Tabla P10.21.
a. Utilizando un programa de hoja de cálculo, dibuje la relación esfuerzo–deformación.
b. Calcule el módulo de elasticidad.
c. ¿Cuál es el esfuerzo de fractura?

10.22 Se prepara una probeta de madera de dimensiones 1× 1× 4 pulgadas, siendo la veta paralela a su longitud. La probeta se somete a un ensayo de compresión paralela a la veta hasta fractura. Los resultados de carga (P) en función de la deformación (ΔL) son los mostrados en la Tabla P10.22. Utilizando un programa de hoja de cálculo, complete la tabla calculando el esfuerzo de diseño (σ) y la deformación de diseño (ε). Determine la tenacidad del material (u_t) calculando el área situada bajo la curva esfuerzo–deformación, es decir,

$$u_t = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \, d\varepsilon$$

Tabla P10.21

Carga (kN)	Deformación (mm)
0	0
8,9	0,457
17,8	0,597
26,7	0,724
35,6	0,838
44,5	0,965
53,4	1,118
62,3	1,270
71,2	1,422
80,1	1,588
89,0	1,765
97,9	1,956
106,8	2,159
111,3	2,311

Tabla P10.22

Observación Nº	P (libras)	ΔL (pulg.)	σ (psi)	ε (pulg./pulg.)	u_t (psi)
0	0	0			No aplicable
1	720	0,020			
2	1720	0,048			
3	2750	0,076			
4	3790	0,108			
5	4606	0,140			
6	5338	0,164			
7	6170	0,200			
8	6480	0,224			
9	5400	0,253			
					$u_t =$

donde ε_f es la deformación en fractura. Esta integral se puede aproximar numéricamente utilizando una técnica de integración trapezoidal:

$$u_t = \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})$$

10.23 Hay que construir un pilar corto de madera con un diámetro de 10 pulgadas. Si el esfuerzo de fractura es de 7,3 ksi, ¿cuál será la carga máxima que puede aplicarse a este pilar si se utiliza un factor de seguridad de 1,3?

10.24 Con el propósito de diseñar estructuras de madera, las propiedades de resistencia medidas en el laboratorio se ajustan para tener en cuenta las condiciones de la aplicación. Indique cinco condiciones de aplicación distintas que se utilicen para ajustar las propiedades relativas a la resistencia.

10.25 ¿Cuáles son los cinco tipos de organismos que atacan a la madera?

10.26 ¿Cuáles son los dos tipos de preservantes que pueden utilizarse para proteger la madera de la descomposición? ¿Cómo se aplican estos preservantes?

10.27 ¿Cuáles son los tipos principales de productos de madera manufacturados?

10.28 ¿Cuáles son las principales ventajas de los productos de madera manufacturados, con respecto a los elementos de madera natural?

10.14 Referencias

American Forest & Paper Association, American Wood Council. *National Design Specification for Wood Construction*. Washington, D.C: American Forest & Paper Association, American Wood Council, 2005.

APA-EWS, PRL-501. *Performance Standard for APA EWS Laminated Veneer Lumber*. Tacoma, WA: APA-The Engineered Wood Association, 2000.

APA-EWS, *Glulam Design Properties and Layup Combinations*. Tacoma, WA: APA-The Engineered Wood Association, 2004.

e-builder. http://www.ebuild.com/guide/resources/product-news.asp? ID=81435, 2005.

Forintek. *Borate-Treated Wood for Construction*. Forintek Canada Corp. http://durable-wood.com/pdfs/borate-eng1oct02.pdf, 2002.

Levin, E., ed. *The International Guide to Wood Selection*. Nueva York, NY: Drake Publishers, Inc, 1972.

Panshin, A. J. y C. De Zeeuw. *Textbook of Wood Technology*. Cuarta edición. Nueva York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1980.

Southern Pine Council, Southern Pine Products, Association. *Pressure Treated Southern Pine*. Kenner, LA: Southern Pine Council, Southern Pine Products Association, 1990.

Trusjoist. *Specifier's Guide, Parallam PSL Headers, Beams, and Columns*. Boise, ID: Trus Joist, a Weyerhaeuser Business.
http://www.trusjoist. com/PDFFiles/2060.pdf, 2003.

USDA-FS. *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material.* Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/ fplgtr113/fplgtr113.htm, 1999.

Van Vlack, L.H. *Materials for Engineering: Concepts and Applications*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1982.

Van Vlack, L.H. *Elements of Materials Science and Engineering*, Sexta edición. Reading, MA: Addison Wesley, 1989.

Williamson, T.G. (ed.). *APA Engineered Wood Handbook.* Nueva York, NY: McGraw-Hill Book Company, 2002.

11

COMPUESTOS

La necesidad de disponer de materiales con propiedades que no se pueden encontrar en los materiales convencionales, combinada con los avances en la tecnología, ha dado como resultado el desarrollo de materiales compuestos, que se fabrican combinando dos o más materiales distintos. Estos materiales compuestos suelen combinar las mejores propiedades de sus constituyentes y, frecuentemente, exhiben cualidades que ni siquiera existen en dichos constituyentes. La resistencia, la rigidez, el peso específico, la resistencia a la fractura, la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste, el atractivo, la resistencia a la fatiga, la susceptibilidad a la temperatura, el aislamiento térmico, la conductividad térmica y el aislamiento acústico pueden mejorarse utilizando materiales compuestos. Por supuesto, no todas estas propiedades se mejoran en el mismo compuesto, pero lo normal es que algunas de ellas sí lo hagan. Por ejemplo, los materiales necesarios para construir aeronaves y vehículos espaciales deben ser ligeros, fuertes y rígidos, y exhibir una alta resistencia a la abrasión, al impacto y a la corrosión. Un ejemplo de material compuesto de gran utilidad para los ingenieros civiles es la fibra de vidrio, que es fuerte, rígida y resistente a la corrosión y puede utilizarse para fabricar armaduras de hormigón con las que sustituir las corrosivas armaduras de acero. Estas combinaciones de propiedades resultan formidables y normalmente no pueden encontrarse en los materiales convencionales.

Los materiales compuestos se han utilizado ampliamente a lo largo de la historia con distintos niveles de sofisticación. Por ejemplo, en las civilizaciones de la Antigüedad se utilizaba paja para reforzar los ladrillos de barro. Asimismo, se fabricaban espadas y armaduras con capas de diferentes materiales, con el fin de obtener características especiales. El hormigón de cemento de portland, que combina pasta de cemento y árido con diferentes propiedades para formar un material de construcción fuerte y duradero, se ha utilizado durante muchos años. En los años recientes, se ha empleado hormigón reforzado con fibra como material de construcción, proporcionando una gran fuerza frente a la tracción y la compresión. La industria del automóvil ha estado utilizando metales compuestos para la fabricación de vehículos ligeros que son a la vez fuertes y resistentes al impacto. Recientemente, se ha desarrollado una nueva generación de compuestos, como los plásticos reforzados con fibra y reforzados con partícu-

las, que han permitido revolucionar la industria de los materiales y han abierto nuevos horizontes para las aplicaciones de ingeniería civil y de la construcción.

Aunque existen muchas definiciones diferentes de los compuestos, generalmente se acepta que un compuesto es un material con dos fases o materiales distintos. Los constituyentes de un compuesto suelen tener propiedades físicas significativamente distintas, de modo que las propiedades del compuesto son bastante distintas de las de los constituyentes. Esta definición del concepto de material compuesto elimina muchos materiales multifase que no tienen propiedades diferentes, como por ejemplo muchas aleaciones cuyos componentes son similares.

Existen diversos compuestos naturales, como la madera, que están formados por fibras de celulosa y lignina, o como el hueso, que está formado por una proteína denominada colágeno y una serie de minerales. Sin embargo, en este capítulo, solo vamos a abordar los compuestos artificiales.

Los materiales compuestos se pueden clasificar como *microscópicos* o *macroscópicos,* como se muestra en la Figura 11.1. La distinción entre microscópico y macroscópico depende de la propiedad que se esté considerando. Esta distinción parece arbitraria, pero normalmente los compuestos microscópicos incluyen *fibras* o *partículas* de hasta unos cuantos cientos de micras de tamaño. Por otro lado, los compuestos macroscópicos pueden tener constituyentes de tamaño mucho mayor como las partículas de árido y las barras de armadura en el hormigón.

11.1 Compuestos microscópicos

Muchos materiales compuestos microscópicos consisten en dos fases constituyentes: una fase continua, o *matriz,* y una *fase dispersa* o *fase de refuerzo,* que está rodeada por la matriz. En la mayoría de los casos, la fase dispersa es más dura y rígida que la matriz. Las propiedades del compuesto dependen de las propiedades de ambas fases componentes, de sus propiedades relativas y de la geometría de la fase dispersa, como por ejemplo el tamaño, la forma, la distribución y la orientación de las partículas.

Como se indica en la Figura 11.1, los compuestos microscópicos se dividen en dos clases básicas: *reforzados con fibra* y *reforzados con partículas.* Esta clasificación está basada en la forma de la fase dispersa. La Figura 11.2 muestra compuestos con fibras continuamente alineadas, fibras aleatorias y partículas aleatorias. Los mecanismos de



FIGURA 11.1 Esquema de clasificación de los materiales compuestos.

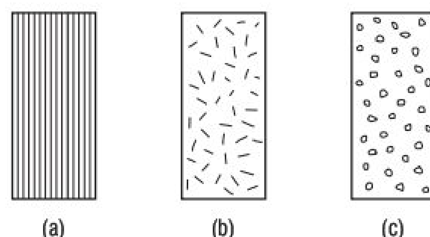


FIGURA 11.2 Esquemáticos de compuestos microscópicos: (a) fibras alineadas, (b) fibras aleatorias y (c) partículas aleatorias.

reforzamiento varían para las diferentes clases y los distintos tamaños y orientaciones de la fase dispersa.

11.1.1 Compuestos reforzados con fibra

Los compuestos microscópicos reforzados con fibra incluyen fibras dispersas en una matriz como por ejemplo un metal o un polímero. Las fibras tienen una relación resistencia-diámetro muy alta, con diámetros de tamaño próximo al de las estructuras cristalinas. Debido al muy pequeño diámetro de las fibras, estas son mucho más fuertes que el material en bruto. Por ejemplo, una placa de vidrio se fractura para esfuerzos de entre 10 kPa y 20 kPa, mientras que las fibras de vidrio presentan resistencias de 3 MPa a 5 MPa o superiores. Las fibras son mucho más fuertes que el material en bruto porque tienen menos defectos internos.

Las fibras pueden clasificarse tomando como base su diámetro y su carácter, dividiéndose en fibrillas, fibras e hilos. Las fibrillas son monocristales muy finos con relaciones longitud-diámetro extremadamente altas y un alto grado de perfección cristalina, lo que las hace extremadamente fuertes. Las fibras tienen diámetros mayores que las fibrillas, mientras que los hilos son mayores aún. Las fibrillas normalmente no se emplean para refuerzo debido a su alto coste, al débil enlace que tienen con la mayoría de los materiales comunes usados como matriz y debido a la dificultad de incorporarlos en la matriz. La Tabla 11.1 muestra algunos materiales utilizados para fabricar fibras, junto con sus características de resistencia.

TABLA 11.1 Materiales y propiedades mecánicas de algunas fibras (Callister, 2003).

Material	Gravedad específica	Resistencia a la tracción, GPa (psi $\times 10^6$)	Módulo de elasticidad, GPa (psi $\times 10^6$)
Fibra aramídica (Kevlar)	1,4	3,5 (0,5)	130 (19)
E-Glass	2,5	3,5 (0,5)	72 (10,5)
Grafito	1,4	1,7 (0,25)	255 (37)
Nylon 6,6	1,1	1,0 (0,14)	4,8 (0,7)
Amianto	2,5	1,4 (0,2)	172 (25)



FIGURA 11.3 Fibras de vidrio comunes (velo, mecha y malla). Fotografía cortesía de Creative Pultrusions, Inc.

Las fibras se fabrican a partir de muchos materiales, como vidrio, carbono y grafito, polímeros, boro, cerámicas y carburo de silicio (Mallick, 1993). Debido a su bajo coste y a su alta resistencia, las fibras de vidrio son las fibras de refuerzo más comunes para los compuestos con matriz polimérica. Las fibras de vidrio están disponibles comercialmente con diversas formas, cada una de las cuales resulta adecuada para diferentes aplicaciones. Las fibras de vidrio comunes incluyen velos, mechas (fibras contiguas) y mallas (Figura 11.3). Una hebra está compuesta por entre 30 y 40 fibras trenzadas que forman una estructura parecida a una cuerda.

Un compuesto común reforzado con fibra es la fibra de vidrio. La fibra de vidrio comercial es simplemente un compuesto formado por fibras de vidrio, continuas o discontinuas, contenidas en una matriz plástica. Entre las aplicaciones típicas de la fibra de vidrio se incluyen la fabricación de aeronaves, automóviles, barcos, contenedores, tanques de agua, aparatos deportivos y revestimientos de suelos.

11.1.2 Compuestos reforzados con partículas

Los compuestos reforzados con partículas consisten en partículas dispersas en una fase matriz. El mecanismo de reforzamiento de los compuestos reforzados con partículas varía con el tamaño de las partículas de refuerzo. Cuando el tamaño de estas está comprendido entre 0,01 micras y 0,1 micras, la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, mientras que las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el movimiento de las dislocaciones. Un ejemplo de compuesto reforzado con partículas es el níquel con dióxido de torio dispersado, en el que aproximadamente un 3% de dióxido de torio (ThO_2) se dispersa finamente en una aleación de níquel con el fin de aumentar su resistencia a altas temperaturas. Por otro lado, cuando las partículas son mayores de una micra, actúan como relleno para mejorar las propiedades de la fase matriz y/o para sustituir parte de su volumen, dado que el relleno normalmente es más ba-

rato. En este caso, la matriz dificulta los movimientos en la vecindad de las partículas. De ese modo, la carga aplicada es compartida por la matriz y por la fase dispersa. Cuanto más fuerte sea el enlace entre las partículas dispersas y la matriz, mayor será el efecto de refuerzo. Un ejemplo de refuerzo con partículas sería añadir materiales de relleno a los polímeros con el fin de mejorar las resistencias a la abrasión y a la compresión, la tenacidad, las propiedades dimensionales y térmicas y otras propiedades.

11.1.3 Fase matriz

Típicamente, la matriz utilizada en la mayoría de los compuestos microscópicos es un polímero (plástico) o un metal. La matriz aglutina los materiales dispersos (partículas o fibras), transfiere las cargas hacia ellos y los protege frente al ataque medioambiental y los daños debidos a la manipulación. Los polímeros tienen la ventaja de su bajo coste, su fácil procesamiento, su buena resistencia química y su baja gravedad específica. Las desventajas de los polímeros son su baja resistencia, su bajo módulo, las bajas temperaturas de operación y la baja resistencia a la exposición prolongada a la luz ultravioleta y a algunos disolventes. Por otro lado, los metales presentan una alta resistencia, un alto módulo, una alta tenacidad y una gran resistencia al impacto, así como una relativa insensibilidad a las variaciones de temperatura, además de una alta resistencia a las altas temperaturas y a otras condiciones ambientales severas. Sin embargo, los metales exhiben una alta densidad y una alta temperatura de procesamiento, a causa de su alto punto de fusión. Los metales también pueden reaccionar con las partículas y fibras y son vulnerables a los ataques por corrosión (Agarwal y Broutman, 1990). Los metales más comúnmente utilizados como fase matriz en los compuestos son las aleaciones de aluminio y de titanio.

11.1.4 Fabricación

La fabricación de compuestos microscópicos combina a menudo la producción del material durante la fabricación del compuesto. El compuesto se forma combinando la matriz y el material disperso. Se han utilizado diversos métodos para fabricar compuestos. La selección del proceso de fabricación se suele basar en la naturaleza química de la matriz y de la fase dispersa y en la temperatura requerida para formar, fundir o curar la matriz. La Figura 11.4 ilustra la fabricación de compuestos reforzados con fibra para formas estructurales utilizando el proceso de extrusión por estirado. Se trata de un proceso automatizado para la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibra y que da lugar a perfiles contiguos de sección transversal constante.

11.1.5 Aplicaciones de ingeniería civil

Los compuestos microscópicos se han utilizado en muchas aplicaciones de ingeniería civil y de la construcción en las últimas décadas. De hecho, los materiales compuestos compiten con los materiales de construcción convencionales y en ocasiones son preferibles a estos. Los ingenieros civiles utilizan compuestos como formas estructurales en

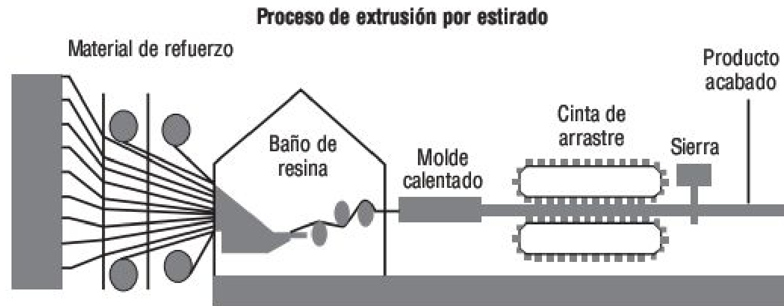


FIGURA 11.4 Esquema de extrusión por estirado utilizado para fabricar compuestos reforzados con fibra para formas estructurales. Cortesía de Creative Pultrusions, Inc.

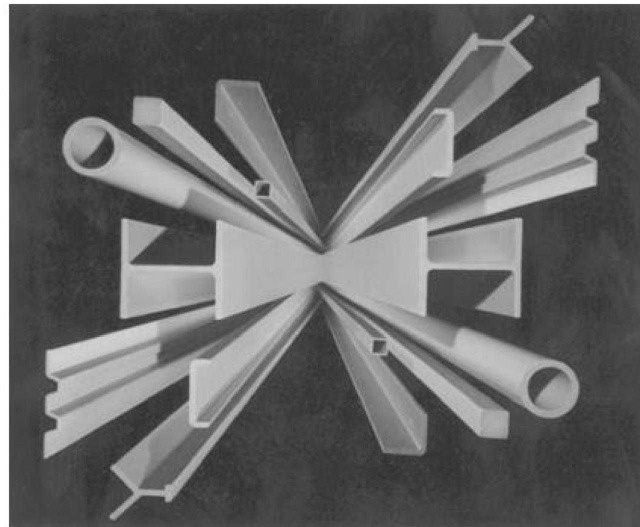


FIGURA 11.5 Formas estructurales fabricadas con compuestos de fibra de vidrio. Cortesía de Creative Pultrusions, Inc.

edificios y en otras estructuras, pudiendo estos materiales sustituir a las formas estructurales de acero y aluminio (Figura 11.5). La Tabla 11.2 proporciona un ejemplo de propiedades físicas de varillas y barras redondeadas fabricadas con un compuesto reforzado con fibra.

Las armaduras de polímero reforzado con fibra (fibra de vidrio) también pueden utilizarse para reforzar el hormigón en lugar de las armaduras de acero. Se han empleado compuestos para fabricar tanques, suelos industriales, armazones y vigas, aceras y plataformas, plantas de tratamiento de aguas, barandillas, tuberías de plástico, postes ligeros, paneles y soportes para puertas y ventanas, y chasis para aparatos eléctricos. Los compuestos también pueden utilizarse para reforzar y envolver pilares y soportes de puentes que se vean parcialmente dañados por terremotos y otros factores medioambientales (Grace, 2002) (véanse las Figuras 11.6 – 11.9).

TABLA 11.2 Ejemplo de propiedades físicas de barras y varillas redondeadas fabricadas con un compuesto reforzado con fibra (Creative Pultrusions, Inc., 1997).

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción (ASTM D638)	830 MPa (120×10^3 psi)
Módulo de elasticidad en tracción (ASTM D638)	45 GPa ($6,5 \times 10^6$ psi)
Resistencia a la flexión (ASTM D790)	830 MPa (120×10^3 psi)
Resistencia a la compresión (ASTM D695)	480 MPa (70×10^3 psi)
Resistencia al impacto de Izod (ASTM D256)	2,1 kJ/m (40 pie-libra/pulg.)
Dureza de Barcol (ASTM D2583)	50
Absorción de agua (ASTM D570)	0,25% (máximo)
Gravedad específica (ASTM D792)	2,0
Coeficiente de expansión térmica (ASTM D696)	$5,2 \times 10^{-6}$ m/m/°C ($9,4 \times 10^{-6}$ pulg./pulg./°F)



FIGURA 11.6 Envoltura de una vieja estructura con compuesto polimérico reforzado con fibra de vidrio (FRP) (Muelle de la Avenida Wabash, Baltimore).



FIGURA 11.7 Envoltura de los pilares de un puente con compuestos FRP.

El hormigón reforzado con fibra es otro material compuesto que ha sido utilizado por los ingenieros civiles en diversas aplicaciones estructurales. Para reforzar el hormigón pueden utilizarse distintos tipos de fibras, como fibras independientes, hebras desmenuzadas o mechas. Si se emplean fibras independientes o hebras desmenuzadas, se las mezcla con el hormigón fresco de forma aleatoria. En tal caso, las fibras dificultan e impiden la progresión de las grietas en el hormigón. La Figura 11.10 muestra una micrografía electrónica de barrido de un mortero de hormigón mezclado con fibras de carbono de una longitud de aproximadamente 3 mm, en una fracción de volumen del 12%. Por otro lado, las mechas de fibras se colocan en la dirección en la que se vaya a aplicar la tensión en el elemento estructural. En este caso, las fibras soportan los efectos de tracción. En general, las fibras incrementan la resistencia a la tracción y a la flexión del hormigón, de modo que pueden diseñarse elementos estructurales más eficientes. La Tabla 11.3 muestra rangos típicos de propiedades físicas del hormigón reforzado con fibra de vidrio a los 28 días. Las investigaciones demuestran que el hormigón reforzado con fibra de vidrio presenta una resistencia a la flexión entre dos y tres veces superior a la del hormigón no reforzado. Además, el material no se fractura abruptamente al incrementarse la carga, sino que se flexa de forma gradual. Esta flexión gradual se produce debido a que las fibras son más fuertes que la matriz y detienen, por tanto, las grietas. Por ello, en lugar de producirse un agravamiento de la primera grieta que aparezca en el hormigón, lo que pasa es que se desarrollan más grietas en otros lugares y la fractura tiene lugar finalmente cuando las fibras se sueltan o se rompen (Neal, 1977).

El aire atrapado en el hormigón también puede considerarse como componente de un material compuesto microscópico. El aire atrapado incrementa la durabilidad del

hormigón, dado que libera los esfuerzos internos debidos a la congelación del agua dentro del hormigón. Sin embargo, para una misma relación agua–cemento, las burbujas de aire reducen la resistencia del hormigón en aproximadamente un 20%. Puesto que el aire atrapado también mejora la facilidad de trabajo del hormigón fresco, la relación agua–cemento puede disminuirse para compensar parte de la reducción de la resistencia.



(a)



(b)

FIGURA 11.8 Viaducto de Woodland sobre la línea norte de metro en Weschester County, Nueva York: (a) reforzamiento con compuesto FRP y (b) estructura acabada.



FIGURA 11.9 Refuerzo de un puente de hormigón con armaduras FRP.

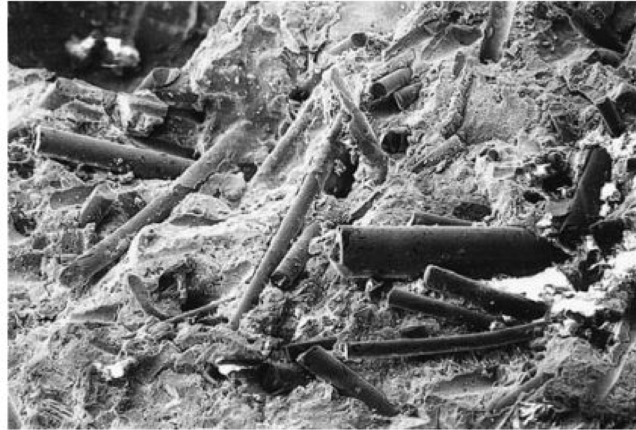


FIGURA 11.10 Micrografía electrónica de barrido de un mortero de hormigón mezclado con fibras de carbono.

TABLA 11.3 Rangos típicos de propiedades físicas del hormigón reforzado con fibra de vidrio a los 28 días (Neal, 1977).

Propiedad	Valor
Resistencia a la flexión	21–32 MPa (3,0–4,6 ksi)
Resistencia a la tracción	7–11 MPa (1,0–1,6 ksi)
Resistencia a la compresión	50–79 MPa (7,2–11,4 ksi)
Resistencia de impacto	10–25 kN/m (57–143 pulg. libra/pulg^2)
Módulo de elasticidad	10,5–20,5 GPa (1,5–3,0 $\times$ 10^6 psi)
Densidad	1,70–2,10 Mg/m^3 (105–130 libra/pie^3)

11.2 Compuestos macroscópicos

Los compuestos macroscópicos se utilizan en muchas aplicaciones de ingeniería. Puesto que los compuestos macroscópicos tienen tamaños relativamente grandes, el modo en que se soporte la carga y el grado en que se mejoren las propiedades del compuesto varían de un compuesto a otro. Entre los compuestos macroscópicos más comúnmente utilizados por los ingenieros civiles y de la construcción se incluyen el hormigón de cemento portland normal, el hormigón con armadura de acero, el hormigón asfáltico y la madera manufacturada, como por ejemplo madera laminada encolada o tableros de tiras para aplicaciones estructurales.

11.2.1 Hormigón de cemento portland normal

El hormigón de cemento portland normal es un material compuesto que consta de pasta de cemento y de partículas de árido, con diferentes propiedades físicas y mecánicas como ya hemos explicado en el Capítulo 7 (Figura 11.11). Las partículas de árido del hormigón actúan como material de relleno, dado que es más barato que el cemento portland. Además, dado que la pasta de cemento se contrae al curarse, el árido mejora la estabilidad de volumen del hormigón. Cuando una estructura de hormigón se somete a una carga, la pasta de cemento y el árido comparten esa carga. Tanto la resistencia de las partículas de árido como la unión entre el árido y la pasta de cemento desempeñan un papel importante a la hora de determinar la resistencia del compuesto de hormigón, que está limitada por el más débil de esos dos factores. La unión entre la pasta de cemento y el árido se ve afectada por la rugosidad y el grado de absorción de las partículas de árido, así como por otras propiedades físicas y químicas de este.

11.2.2 Hormigón de cemento portland reforzado

El hormigón con armadura de acero puede considerarse un material compuesto formado por hormigón normal y barras de acero, como se muestra en la Figura 11.12. Puesto que el hormigón presenta una resistencia a la tracción muy baja, que normalmente se suele ignorar cuando se diseñan estructuras de hormigón, la armadura de acero suele colocarse en aquellas áreas de la estructura que estén sujetas a tensión. Cuando la estructura de hormigón se somete a una carga, el hormigón soporta los esfuerzos de compresión, mientras que el acero soporta los esfuerzos de tracción. En tales casos, el acero permite usar el hormigón como elemento estructural para soportar esfuerzos de tracción. La armadura de acero también se emplea en áreas sujetas a compresión, como los pilares, con el fin de compartir las cargas. En tales casos, el acero reduce el área de sección transversal requerida del elemento sometido a compresión, dado que la resistencia a la compresión del acero es mayor que la del hormigón. Las armaduras de acero también se emplean en el hormigón pretensado, en el que el refuerzo se pretensa sometiéndolo a tracción, de modo que el hormigón se ve sometido a compresión aun



FIGURA 11.11 Sección transversal de un elemento de hormigón de cemento portland en la que se ven la pasta de cemento y las partículas de árido.

cuando se cargue externamente. En estos casos, puede utilizarse un área de sección transversal más pequeña para el elemento de hormigón. La armadura de acero también puede usarse para controlar las grietas en el hormigón debidas a los cambios de temperatura. Por ejemplo, los pavimentos de hormigón a veces se refuerzan colocando barras de acero longitudinales y transversales a mitad de altura de la losa de hormigón. Así, cuando el hormigón se contrae debido a una disminución de la temperatura ambiente, se desarrollan muchas grietas; estas grietas están distribuidas uniformemente en la sección de pavimento, pero cada una de ellas será estrecha. Típicamente, las grietas estrechas no resultan dañinas para el pavimento de hormigón, dado que transfieren la carga desde un sitio a otro de la grieta mediante un mecanismo de entrelazamiento. En todas las aplicaciones del hormigón con armadura de acero, la unión entre la armadura y el hormigón es importante para permitir al compuesto trabajar como una unidad. Es por eso que las barras de armadura tienen una superficie deformada, con el fin de impedir el deslizamiento entre el acero y el hormigón.

11.2.3 Hormigón asfáltico

El hormigón asfáltico utilizado en los pavimentos es otro material compuesto. Está formado por dos materiales con propiedades diferentes, tal como hemos visto en el Capítulo 9. El hormigón asfáltico está compuesto por aproximadamente un 95% de árido y un 5% de aglomerante asfáltico, estando expresados los porcentajes en peso. Cuando

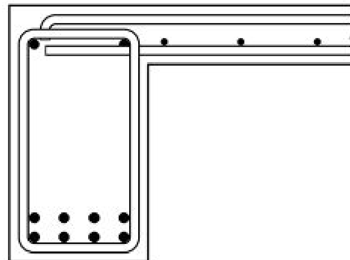


FIGURA 11.12 Ejemplo de viga de hormigón con armadura de acero.

se aplican las cargas de tráfico al compuesto de hormigón asfáltico, la mayoría de los esfuerzos de compresión son soportados por el contacto árido–árido. El asfalto actúa como aglomerante que impide el deslizamiento relativo de las partículas de árido. Cuando se aplican esfuerzos de tracción debidos a la flexión de la capa de hormigón asfáltico o a la contracción térmica, el aglomerante asfáltico da soporte a las partículas de árido. Una propiedad importante del asfalto es que se reblandece a altas temperaturas y se vuelve quebradizo a bajas temperaturas, mientras que las propiedades del árido no cambian cuando varía la temperatura. Es importante, por tanto, seleccionar apropiadamente la calidad de asfalto que permitirá obtener un comportamiento adecuado dentro del rango de temperaturas habitual de la región en la que se vaya a usar el compuesto. Asimismo, puesto que el árido representa una parte principal de la mezcla, es importante utilizar árido con una granulometría adecuada y con propiedades correctas. El contenido de aglomerante asfáltico debe diseñarse cuidadosamente, para garantizar que las partículas de árido estén recubiertas completamente, pero sin una lubricación excesiva. Cuando se diseña y compacta apropiadamente la mezcla de hormigón asfáltico, esta debería poder durar un largo periodo de tiempo sin fallar.

11.2.4 Madera manufacturada

La madera manufacturada se fabrica uniendo toras, chapas o trozos de madera con diferentes orientaciones de veta, con el fin de producir unidades de gran tamaño. Puesto que la madera manufacturada consta de componentes del mismo material, no se la podría considerar un compuesto según nuestra definición. Sin embargo, incluimos la madera manufacturada en este capítulo porque este producto sigue un mecanismo de reforzamiento similar al de los compuestos. Puesto que la madera tiene propiedades anisotrópicas debido a la existencia de las vetas, la madera manufacturada permite obtener un comportamiento específico y coherente y presenta, en consecuencia, propiedades de diseño también coherentes. Por ejemplo, si alternamos la orientación de la veta en las láminas de contrachapado, obtenemos propiedades casi idénticas según la longitud y la anchura, y también se proporciona una resistencia a los cambios dimensionales en condiciones de humedad variables. El compuesto de contrachapado presenta aproximadamente la décima parte del cambio dimensional de la madera sólida, para cualquier condición de temperatura o humedad. Como hemos visto en el Capítulo 10, entre los productos de madera manufacturados se incluyen el contrachapado, los tableros de tiras orientadas, los paneles compuestos, la madera laminada–encolada (glulam), la madera de chapas laminada, la madera de tiras paralelas, la madera de tiras orientadas y las vigas en I de madera.

11.3 Propiedades de los compuestos

Las propiedades de los materiales compuestos se ven afectadas por las propiedades de los componentes, por la fracción en volumen de esos componentes, por el tipo y orien-

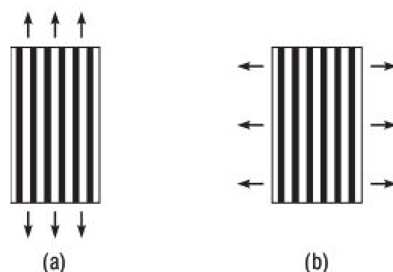


FIGURE 11.13 Patrones de carga de compuestos reforzados con fibras continuamente alineadas: (a) carga paralela a las fibras y (b) carga perpendicular a las fibras.

tación de la fase dispersa y por la unión entre la fase dispersa y la fase matriz. Las propiedades del compuesto pueden verse como una media ponderada de las propiedades de los componentes (Shackelford, 1996). Pueden desarrollarse ecuaciones para estimar las propiedades del compuesto bajo ciertas propiedades idealizadas de los materiales, ciertos patrones idealizados de carga y ciertas condiciones geométricas ideales. Entre las suposiciones que podemos hacer para simplificar el análisis se incluyen:

- Cada componente tiene propiedades lineales, elásticas e isotrópicas.
- Existe una unión perfecta entre la fase dispersa y la matriz sin deslizamientos.
- La geometría del compuesto está idealizada y el patrón de carga es paralelo o perpendicular a las fibras de refuerzo.

11.3.1 Carga paralela a las fibras

Cuando a un compuesto reforzado con fibras alineadas se le aplica una carga paralela a las fibras, como se puede ver en la Figura 11.13(a), tanto la matriz como la fase de fibra se deforman por igual. En esas condiciones, las deformaciones de ambas fases coincidirán (lo que se conoce como *condición de isodeformación*), y están dadas por la fórmula:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon \tag{11.1}$$

donde

ε = deformación total
ε_c = deformación del compuesto
ε_m = deformación de la matriz
ε_f = deformación de la fibra

Asimismo, la fuerza aplicada al compuesto F_c es la suma de la fuerza soportada por la matriz F_m y la fuerza soportada por las fibras F_f:

$$F_c = F_m + F_f \tag{11.2}$$

De este modo,

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \tag{11.3}$$

donde

σ_i = esfuerzo del componente i
A_i = área del componente i

Sustituyendo σ por $E\varepsilon$ para cada material, podemos escribir la Ecuación 11.3 como

$$E_c \varepsilon A_c = E_m \varepsilon A_m + E_f \varepsilon A_f \tag{11.4}$$

donde E es el módulo de elasticidad. Eliminando ε y dividiendo entre A_c, tenemos

$$E_c = E_m \frac{A_m}{A_c} + E_f \frac{A_f}{A_c} \tag{11.5}$$

o

$$E_c = v_m E_m + v_f E_f \tag{11.6}$$

donde v es la fracción en volumen de cada componente y $v_m + v_f = 1$.

La Ecuación 11.6 muestra que el módulo de elasticidad del compuesto es la media ponderada de los módulos de los componentes.

La parte de carga soportada por las fibras se puede determinar como sigue:

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_c A_c} = \frac{E_f \varepsilon A_f}{E_c \varepsilon A_c} = \frac{E_f}{E_c} v_f \tag{11.7}$$

Problema de ejemplo 11.1

Calcule el módulo de elasticidad de una fibra de vidrio en condiciones de isodeformación si la fibra de vidrio está compuesta por un 70% de fibras de E-glass y un 30% de epoxy en volumen. Calcule asimismo el porcentaje de carga soportado por las fibras de vidrio. El módulo de elasticidad de la fibra de vidrio y del epoxy son 70,5 GPa y 6,9 GPa, respectivamente.

Solución

A partir de la Ecuación 11.6,

$$E_c = (0,3)(6,9) + (0,7)(70,5) = 51,4 \text{ GPa}$$

A partir de la Ecuación 11.7,

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{70,5}{51,4}(0,7) = 0,96 = 96\%$$

Este ejemplo demuestra que, en las condiciones dadas, el 96% de la carga es soportada por las fibras.

■

La Ecuación 11.6 puede generalizarse para cubrir otras propiedades de los compuestos en función de las propiedades de los componentes, de la manera siguiente:

$$X_c = v_m X_m + v_f X_f \tag{11.8}$$

donde X es una propiedad tal como la relación de Poisson, la conductividad térmica, la conductividad eléctrica o la difusividad.

11.3.2 Carga perpendicular a las fibras

Cuando a un compuesto reforzado con fibras alineadas se le aplica una carga perpendicular a las fibras [Figura 11.13(b)], tanto la matriz como la fase de fibras estarán sujetas al mismo esfuerzo (condición de isoesfuerzo). En otras palabras,

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \tag{11.9}$$

La elongación del compuesto en la dirección del esfuerzo aplicado será la suma de las elongaciones de la matriz y de las fibras:

$$\Delta L_c = \Delta L_m + \Delta L_f \tag{11.10}$$

Dividiendo la Ecuación 11.10 entre la longitud del compuesto L_C en la dirección del esfuerzo, obtenemos

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} = \frac{\Delta L_m}{L_c} + \frac{\Delta L_f}{L_c} \tag{11.11}$$

Suponiendo que las fibras tienen un espesor uniforme, la longitud acumulada de cada componente en la dirección del esfuerzo será proporcional a su fracción de volumen. Por tanto,

$$L_m = v_m L_c \tag{11.12}$$

y

$$L_f = v_f L_c \tag{11.13}$$

Sustituyendo los valores de L_C de las Ecuaciones 11.12 y 11.13 en la Ecuación 11.11 obtenemos

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} = \frac{v_m \Delta L_m}{L_m} = \frac{v_f \Delta L_f}{L_f} \tag{11.14}$$

Dado que $\varepsilon = \dfrac{\Delta L}{L}$, la Ecuación 11.14 puede reescribirse como

$$\varepsilon_c = v_m \varepsilon_m + v_f \varepsilon_f \tag{11.15}$$

Sustituyendo ε por σ/E obtenemos que

$$\frac{\sigma}{E_c} = v_m \frac{\sigma}{E_m} + v_f \frac{\sigma}{E_f} \tag{11.16}$$

o

$$\frac{1}{E_c} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_f}{E_f} \tag{11.17}$$

La Ecuación 11.17 puede reescribirse como

$$E_c = \frac{E_m E_f}{v_m E_f + v_f E_m} \tag{11.18}$$

Al igual que con la Ecuación 11.8, la Ecuación 11.18 puede generalizarse como sigue:

$$X_c = \frac{X_m X_f}{v_m X_f + v_f X_m} \tag{11.19}$$

donde X es una propiedad como la conductividad térmica, la conductividad eléctrica o la difusividad.

Los módulos de las Ecuaciones 11.6 y 11.18 pueden dibujarse en función de la fracción de volumen de la fibra, como se muestra en la Figura 11.14. Claramente, las fibras son más efectivas a la hora de elevar el módulo del compuesto cuando la carga se aplica en paralelo a las fibras que cuando se aplica en perpendicular a las mismas.

11.3.3 Compuestos de fibras orientadas aleatoriamente

A diferencia de los compuestos con fibras continuamente alineadas, las propiedades mecánicas de los compuestos con fibras orientadas aleatoriamente son isotrópicas. El mó-

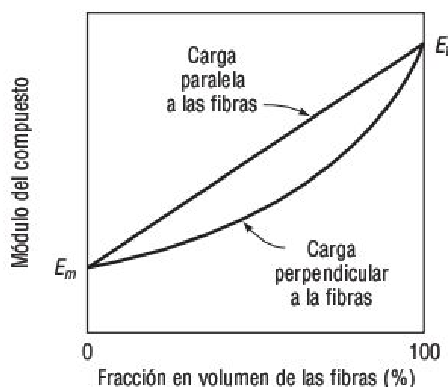


FIGURA 11.14 Módulo de elasticidad del compuesto en función del de la fracción de volumen de las fibras.

dulo de elasticidad de los compuestos con fibras orientadas aleatoriamente cae entre el módulo correspondiente a la condición de carga paralela a las fibras y la condición de carga perpendicular a las fibras. Para estimar el módulo de elasticidad de los compuestos con fibras orientadas aleatoriamente, la Ecuación 11.6 puede reescribirse como

$$E_c = v_m E_m + K v_f E_f \tag{11.20}$$

donde K es un parámetro de eficiencia de la fibra (Callister, 1985). Para fibras distribuidas aleatoria y uniformemente dentro de las tres dimensiones del espacio, K tiene un valor de 0,2.

Problema de ejemplo 11.2

Un compuesto de fibra de vidrio consta de una matriz de epoxy reforzada con fibras de E-glass aleatoriamente orientadas y uniformemente distribuidas. El módulo de elasticidad de las fibras de vidrio y del epoxy son 65 GPa y 7 GPa, respectivamente. Si el porcentaje en volumen de las fibras es del 30% y la eficiencia de las fibras es igual a 0,2, calcule el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio.

Solución

Aplicando la Ecuación 11.20, tenemos

$$E_c = 0{,}67 \times 7 + 0{,}2 \times 0{,}33 \times 65 = 9{,}0 \text{ GPa}$$

11.3.4 Compuestos reforzados con partículas

El análisis de carga de un compuesto reforzado con partículas depende de la naturaleza específica de la fase dispersa y de la matriz. Un análisis riguroso de la carga de un compuesto reforzado con partículas puede llegar a ser muy complejo. Las Ecuaciones 11.6 y 11.18 sirven como límites superior e inferior de las propiedades del compuesto reforzado con partículas.

R E S U M E N

La combinación de diferentes materiales para obtener un compuesto que tenga mejores propiedades que las de los materiales componentes, ha estado aplicándose desde la Antigüedad. De hecho, muchos de los materiales convencionales actualmente utilizados en ingeniería civil son compuestos, incluyendo el hormigón de cemento portland, el hormigón armado, el hormigón asfáltico y las maderas manufacturadas. Generalmente, los compuestos se clasifican como reforzados con fibra o con partículas, dependiendo

de la naturaleza del material de la fase dispersa. Las propiedades de los compuestos dependen de las características de los materiales componentes, de la unión entre la fase dispersa y la matriz, y de la orientación de la fase dispersa.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

11.1 ¿Qué es un material compuesto? Cite algunos materiales compuestos que utilice en su vida cotidiana.

11.2 Indique cinco ventajas de los materiales compuestos con respecto a los materiales convencionales.

11.3 Defina los compuestos microscópicos. ¿Cuáles son las dos fases de estos compuestos?

11.4 ¿Cuáles son los dos tipos de compuestos microscópicos? Indique los mecanismos de reforzamiento que existen en cada tipo.

11.5 ¿Por qué las fibras son mucho más fuertes que el material original en bruto? Proporcione un ejemplo de un material que sea relativamente débil en bruto y bastante fuerte en forma de fibra.

11.6 Compare las propiedades deseadas de la matriz y de la fase de fibra en los compuestos reforzados con fibra.

11.7 Indique tres funciones de la fase matriz en los compuestos reforzados con fibra. Explique la razón de que sea necesaria una unión fuerte entre las fibras y la matriz.

11.8 ¿Cuáles son las funciones del árido utilizado en el hormigón de cemento portland?

11.9 ¿Cómo es soportada la carga por el hormigón asfáltico en los casos de tracción y compresión? ¿En qué condiciones está sujeta a tracción la capa de hormigón asfáltico?

11.10 Describa brevemente por qué la madera manufacturada es más fuerte y tiene mejores propiedades que la madera natural.

11.11 Calcule el módulo de elasticidad del compuesto carbono–epoxy en condiciones de isodeformación, si el compuesto está formado por un 30% de fibras de carbono y un 70% de epoxy, en volumen. Calcule asimismo el porcentaje de carga soportado por las fibras de carbono. El módulo de elasticidad de las fibras de carbono y del epoxy son 50×10^6 psi y $0{,}5 \times 10^6$ psi, respectivamente.

11.12 Repita el Problema 11.11 para un 40% de fibras de carbono en volumen.

11.13 Repita el Problema 11.11 en condiciones de isoesfuerzo.

11.14 Calcule el módulo de elasticidad del compuesto carbono–epoxy en condiciones de isodeformación, si el compuesto está formado por un 50% de fibras de carbono y un 50% de epoxy en volumen. Calcule asimismo el porcentaje de carga soportado por las fibras de carbono. El módulo de elasticidad de las fibras de carbono y del epoxy son 350 GPa y 3,5 GPa, respectivamente.

11.15 Repita el Problema 11.14 para un 30% de fibras de carbono en volumen.

11.16 Repita el Problema 11.14 bajo condiciones de isoesfuerzo.

11.17 Un compuesto de fibra de vidrio está formado por una matriz de epoxy reforzada con fibras de E-glass aleatoriamente orientadas y uniformemente distribuidas. El módulo de elasticidad de las fibras de vidrio y del epoxy son 70 GPa y 6 GPa, respectivamente. Calcule el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio si el porcentaje de volumen ocupado por las fibras es (a) el 25%, (b) el 50% y (c) el 75%. Dibuje una gráfica que muestre la relación entre el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio y el porcentaje de fibras. Comente el efecto que el porcentaje de fibras de vidrio tiene sobre el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio.

11.18 Un compuesto de fibra de vidrio está formado por una matriz de epoxy reforzada con fibras de E-glass aleatoriamente orientadas y uniformemente distribuidas. El módulo de elasticidad de las fibras de vidrio y del epoxy son 10×10^6 psi y 1×10^6 psi, respectivamente. Calcule el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio si el porcentaje de volumen ocupado por las fibras es (a) el 30%, (b) el 50% y (c) el 70%. Dibuje una gráfica que muestre la relación entre el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio y el porcentaje de fibras. Comente el efecto que el porcentaje de fibras de vidrio tiene sobre el módulo de elasticidad de la fibra de vidrio.

11.19 Un pilar de hormigón armado se somete a una carga de compresión axial de 1000 kN. Los módulos de elasticidad del hormigón normal y del acero son 25 GPa y 207 GPa, respectivamente, mientras que el área de la sección transversal del acero representa un 2% de la del hormigón armado. Considerando el pilar como un elemento estructural hecho de un material compuesto y sometido a una carga paralela a las barras de armadura de acero, calcule lo siguiente:

a. El módulo de elasticidad del hormigón armado.
b. La carga soportada por el acero y por el hormigón normal.
c. El área mínima de la sección transversal requerida para el pilar, si el esfuerzo de compresión admisible del hormigón normal es de 20 MPa y teniendo en cuenta que ese esfuerzo de compresión admisible del hormigón normal se alcanzará antes que el del acero.

11.20 Un pilar de hormigón armado se somete a una carga de compresión axial de 500 kips. Los módulos de elasticidad del hormigón normal y del acero son $4{,}5 \times 10^6$ psi y 30×10^6 psi, respectivamente, mientras que el área de la sección transversal del acero representa un 1,8% de la del hormigón armado. Considerando el pilar como un elemento estructural hecho de un material compuesto y sometido a una carga paralela a las barras de armadura de acero, calcule lo siguiente:

a. El módulo de elasticidad del hormigón armado.

b. La carga soportada por el acero y por el hormigón normal.
c. El área mínima de la sección transversal requerida para el pilar, si el esfuerzo de compresión admisible del hormigón normal es de 5000 psi y teniendo en cuenta que ese esfuerzo de compresión admisible del hormigón normal se alcanzará antes que el del acero.

11.4 Referencias

Agarwal, B. D. y L. J. Broutman. *Analysis and Performance of Fiber Composites.* Segunda edición. Nueva York: John Wiley and Sons, 1990.

Callister, W. D., Jr. *Materials Science and Engineering, an Introduction.* Sexta edición. Nueva York: John Wiley and Sons, 2003.

Creative Pultrusions, Inc. *Creative Pultrusions Design Guide.* Alum Bank, PA: Creative Pultrusions, Inc, 1970.

Grace, N.F. *Materials for the Future-Innovative Use for FRP Materials for Construction.* Detroit, MI: The Engineering Society of Detroit, Technology Century, 2002.

Grace, N.F. F.C. Navarre, R.B. Nacy, W. Bonus y L. Collavin. "Design-Construction of Bridge Street Bridge—First CFRP Bridge in the United States," *PCI Journal* 47(5): 20–35, Septiembre/Octubre 2002. http://www.pci.org/pdf/journal/bridge_street.pdf

Mallick, P. K. *Fiber-Reinforced Composites—Materials, Manufacturing, and Design.* Segunda edición. Nueva York: Marcel Dekker, 1993.

Neal, W. "Glass Fiber Reinforced Concrete—A New Composite for Construction." *The Construction Specifier*, March, 1977. Washington, DC: Construction Specifications Institute, 1977.

Shackelford, J. E. *Introduction to Materials Science for Engineers.* Cuarta edición. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

APÉNDICE

MANUAL DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio presentadas en este apéndice pueden llevarse a cabo como parte del curso sobre materiales para ingeniería civil y de la construcción. La mayor parte de los ensayos incluidos en este manual pueden realizarse a lo largo de un semestre. La cantidad de ensayos que se proporcionan da al profesor una amplia flexibilidad para seleccionar los más apropiados. Con el fin de que los estudiantes saquen el máximo partido a las prácticas en el laboratorio, los ensayos deberán coordinarse adecuadamente con los temas teóricos abordados.

Este manual de laboratorio resume los principales componentes de cada método de prueba. Animamos a los estudiantes a que lean los correspondientes métodos de ensayo ASTM o AASHTO (o los vigentes en el país en que vayan a desarrollar su actividad profesional) para conocer los procedimientos de laboratorio en detalle.

En muchos casos, el tiempo disponible para realizar una práctica de laboratorio no es suficiente como para poder efectuar el ensayo completo, tal y como se especifica en el procedimiento ASTM o AASHTO. En consecuencia, el profesor puede limitar el número de probetas que vayan a emplearse o puede eliminar algunas partes del ensayo. No obstante, es recomendable que el estudiante conozca el procedimiento de prueba completo y todas las especificaciones.

En ocasiones, se emplean experimentos distintos para determinar las mismas propiedades de un material, como por ejemplo el contenido de aire en el hormigón mezclado fresco. En tales casos, el profesor puede decidir emplear el ensayo especificado por los organismos oficiales o el que se pueda realizar con los equipos disponibles.

Normalmente, el estudiante deberá elaborar un informe después de cada sesión de trabajo en el laboratorio. El formato de dicho informe puede variar dependiendo de los requisitos establecidos por el profesor. El informe puede incluir los siguientes puntos:

- Título del experimento.
- Designación ASTM o AASHTO.
- Propósito.
- Significado y uso.
- Materiales de prueba.
- Principales equipos.
- Resumen del procedimiento de prueba y condiciones de prueba.
- Resultados y análisis del ensayo.
- Comentarios, conclusiones y recomendaciones. Deberá indicarse y justificarse cualquier variación respecto del procedimiento de prueba estándar.

Experimento 1

Introducción a los dispositivos de medida

Designación ASTM

No existe ningún procedimiento de ASTM que cubra todos los puntos abordados en esta sesión de laboratorio. La información proporcionada al final del Capítulo 1 puede utilizarse como referencia. Resultarán de interés algunas explicaciones acerca de la precisión y el sesgo, lo que se incluye en la norma ASTM C670 (*Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials*, Práctica para la preparación de las especificaciones de precisión y sesgo para los métodos de ensayo sobre materiales de construcción).

Propósito

Presentar a los estudiantes dispositivos de medida comunes, tales como galgas, LVDT, galgas extensimétricas, anillos de calibración, extensímetros, etc. También se puede incluir una introducción a los conceptos de precisión y sesgo.

Aparatos

El profesor puede mostrar uno o más de los siguientes dispositivos:

- Algunas galgas con distintos rangos y sensibilidades (Figuras A.1 y 1.24)



FIGURA A.1 Examen de la sensibilidad y el rango de una galga.

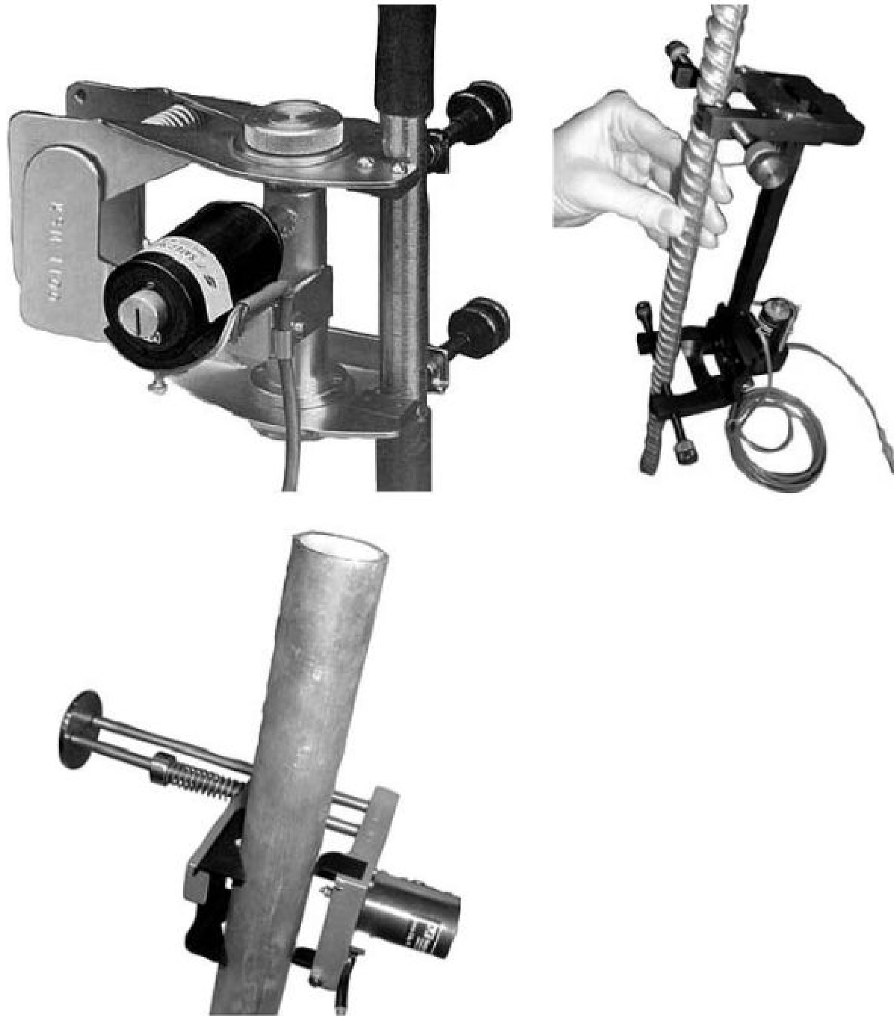


FIGURA A.2 Extensímetros.

- LVDT (Figuras 1.26–1.28) y los accesorios necesarios como fuentes de alimentación, acondicionadores de señales, voltímetros, dispositivos de presentación y dispositivos de calibración.
- Extensímetros (Figuras A.2, 1.25 y 1.29).
- Galgas extensimétricas (Figura 1.30) y los accesorios necesarios.
- Anillos de calibración (Figuras A.3 y 1.31).
- Celdas de carga (Figuras A.4 y 1.32).

Calibración

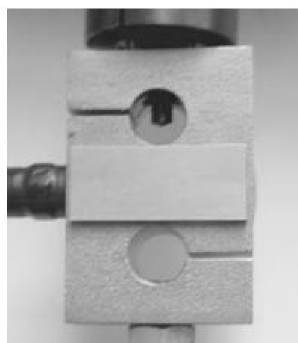
El profesor puede pedir a los estudiantes que calibren uno o más dispositivos de medida, como por ejemplo un anillo de calibración o un LVDT. Pueden emplearse cargas



FIGURA A.3 Calibración de un anillo de calibración mediante un objeto de peso conocido.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA A.4 Celdas de carga.

estáticas para calibrar el anillo de calibración con el fin de obtener una relación entre la fuerza y la lectura proporcionada por el anillo (Figura A.3). Para calibrar el LVDT, se emplean dispositivos de calibración equipados con un micrómetro, como los mostrados en las Figuras A.5 y 1.27. Se obtendrá una relación entre la tensión y el desplazamiento del LVDT.

Requisitos

- Una descripción breve de cada uno de los dispositivos utilizados incluyendo su uso, componentes, teoría de funcionamiento, sensibilidad, etc.
- Ecuaciones, gráficas y tablas de calibración de cada uno de los dispositivos calibrados.



FIGURA A.5 Calibración de un LVDT con un micrómetro utilizando un dispositivo de calibración.

Experimento 2

Ensayo de tracción del acero y el aluminio

Designación ASTM

ASTM E8: *Tension Testing of Metallic Materials* (Prueba de tracción para materiales metálicos).

Propósito

- Determinar la relación esfuerzo–deformación.
- Determinar la resistencia de fluencia.
- Determinar la resistencia a la tracción.
- Determinar la elongación y la disminución del área de la sección transversal.
- Determinar el módulo de elasticidad.
- Determinar la resistencia de fractura.

Significado y uso

Esta prueba proporciona información sobre la resistencia y la ductilidad de los metales sometidos a un esfuerzo de tracción uniaxial. Estos datos resultan útiles para comparar materiales, desarrollar aleaciones, controlar la calidad, realizar diseños para determinadas condiciones y detectar no uniformidades e imperfecciones, como las indicadas por la superficie de fractura.

Aparatos

- Una máquina de pruebas capaz de aplicar una carga de tracción a una velocidad controlada de deformación o de carga. Esta máquina puede ser mecánica o electrohidráulica de circuito cerrado. También puede estar equipada con una galga que indicará la carga o podría estar conectada a un dispositivo de registro de gráficas o a una computadora, con el fin registrar los valores de la carga y la deformación.
- Un dispositivo de tipo abrazadera para transmitir la carga desde la máquina de pruebas a la probeta y garantizar la aplicación de un esfuerzo axial sobre la longitud de la probeta.
- Un extensímetro con un LVDT o una galga para medir la deformación de la probeta.
- Un calibre para medir las dimensiones de la probeta.

Probetas de ensayo

Pueden utilizarse probetas redondeadas o de tipo placa, como las mostradas en las Figuras A.6 y 3.11. Las dimensiones de las probetas están especificadas en la norma ASTM E8.



FIGURA A.6 Probetas de ensayo redondeadas y de tipo placa para las pruebas de tracción del acero y el aluminio.



FIGURA A.7 Extensímetro aplicado a una probeta de acero.

Procedimiento de prueba

1. Marque la longitud de la probeta haciendo unas pequeñas muescas o con tinta.
2. Coloque la probeta en la máquina de carga (Figura 3.12).
3. Conecte el extensímetro a la probeta (Figura A.7).

4. Ponga a cero la escala de medida de la carga y a continuación aplique la carga a una velocidad inferior a 690 kPa/min (100.000 psi/min). A menos que se especifique otra cosa, será adecuada una velocidad de prueba de hasta la mitad de la resistencia a la fluencia o punto de fluencia especificado, es decir, un cuarto de la resistencia a la tracción especificada, la cual es el valor mínimo. Una vez que se haya determinado la resistencia a la fluencia o el punto de fluencia, la tasa de deformación puede incrementarse hasta un máximo de 0,5 pulg./pulg. de la longitud por minuto.
5. Continúe aplicando la carga hasta romper la probeta.
6. Tome nota de los valores de la carga y la deformación para cada incremento de 2,2 kN (500 libras) en el caso del acero y para cada incremento de 890 N (200 libras) en el caso del aluminio, así como antes y después del punto de fluencia.

Análisis y resultados

- Calcule el esfuerzo y la deformación para cada incremento de carga hasta la fractura.
- Dibuje la curva del esfuerzo en función de la deformación.
- Determine la resistencia a la fluencia utilizando el método de desvío, el método de extensión (Figura 1.7), o bien observando el aumento repentino de la deformación.
- Calcule la resistencia a la tracción.

$$\sigma = P_{max}/A_o$$

donde

σ = resistencia a la tracción, MPa (psi)
P_{max} = carga máxima soportada por la probeta durante la prueba de tracción, N (lb)
A_o = área original de la sección transversal de la probeta, mm^2 ($pulg.^2$)

- Calcule la elongación.

$$\text{Porcentaje de elongación} = [(L_s - L_o)/L_o] \times 100$$

donde

L_s = longitud después de la ruptura, mm (pulg.)
L_o = longitud original, mm (pulg.)

Para una elongación > 3,0%, encaje los extremos de la probeta fracturada y mida L_s como la distancia entre las dos marcas originales. Para una elongación ≤ 3,0%, encaje los extremos y aplique una carga axial a lo largo del eje de la probeta que sea suficiente para unir los extremos fracturados; a continuación, mida L_s como la distancia entre las marcas originales.

- Calcule el módulo de elasticidad

$$E = \sigma/\varepsilon$$

donde

E = módulo de elasticidad, MPa (psi)
σ_r = esfuerzo en el límite de proporcionalidad, MPa (psi)
ε = deformación correspondiente, mm/mm (pulg./pulg.)

- Calcule la resistencia a la fractura.

$$\sigma_r = P_f/A_o$$

donde

σ_r = resistencia a la fractura, MPa (psi)
P_f = carga final, N (lb)
A_o = área original de la sección transversal, mm^2 ($pulg.^2$)

- Calcule la reducción del área de la sección transversal

$$\text{Porcentaje de reducción del área de la sección transversal} = [(A_o - A_s)/A_o] \times 100$$

donde

A_s = sección transversal después de la fractura, mm^2 ($pulg.^2$)

Para calcular la sección transversal después de la fractura, encaje los extremos de la probeta fracturada y mida el diámetro medio o la anchura y el espesor medios en la zona de la sección transversal más pequeña.

Sustitución de las probetas

La probeta de prueba deberá sustituirse si:

- La probeta original tiene una superficie inadecuadamente mecanizada.
- Las dimensiones de la probeta son erróneas.
- Las propiedades de la probeta han variado a causa de una inadecuada mecanización.
- El procedimiento de prueba se ha llevado a cabo incorrectamente.
- La fractura se ha producido fuera de la longitud de medida del extensímetro.
- Para determinar la elongación, la fractura se ha producido fuera de la mitad central de la longitud de medida del extensímetro.

Informe

- Relación esfuerzo–deformación.
- Resistencia a la fluencia y el método utilizado.
- Resistencia a la tracción.
- Elongación y longitud original.
- Módulo de elasticidad.
- Resistencia a la fractura.
- Reducción del área de la sección transversal.

Experimento 3

Ensayo de torsión para el acero y el aluminio

Designación ASTM

ASTM E143: *Shear Modulus at Room Temperature* (Módulo de rigidez a temperatura ambiente).

Propósito

Determinar el módulo de rigidez de materiales estructurales como el acero y el aluminio.

Significado y uso

El módulo de rigidez es una propiedad del material que es útil para calcular la conformidad de los materiales estructurales respecto a la torsión, suponiendo que siguen la ley de Hooke, es decir, que el ángulo de torsión es proporcional al par aplicado.

Aparatos

- Máquina para pruebas de torsión (Figuras A.8 y 3.15).
- Abrazaderas para sujetar los extremos de la probeta en las mordazas de la máquina de pruebas.
- Galgas de torsión para medir el ángulo de torsión.

Probetas de ensayo

Pueden emplearse probetas sólidas o huecas con secciones transversales circulares (Figura A.9). Las probetas deben ser de un material limpio y sin defectos. La existencia de ligeras imperfecciones cerca de la superficie, tales como fisuras, que tendrían un efecto despreciable en la determinación del módulo de Young, pueden dar lugar a errores apreciables en la determinación del módulo de rigidez. La longitud de la galga debe ser como mínimo igual a cuatro veces el diámetro. La distancia entre las abrazaderas



FIGURA A.8 Máquina de torsión.



FIGURA A.9 Probetas para la prueba de torsión.

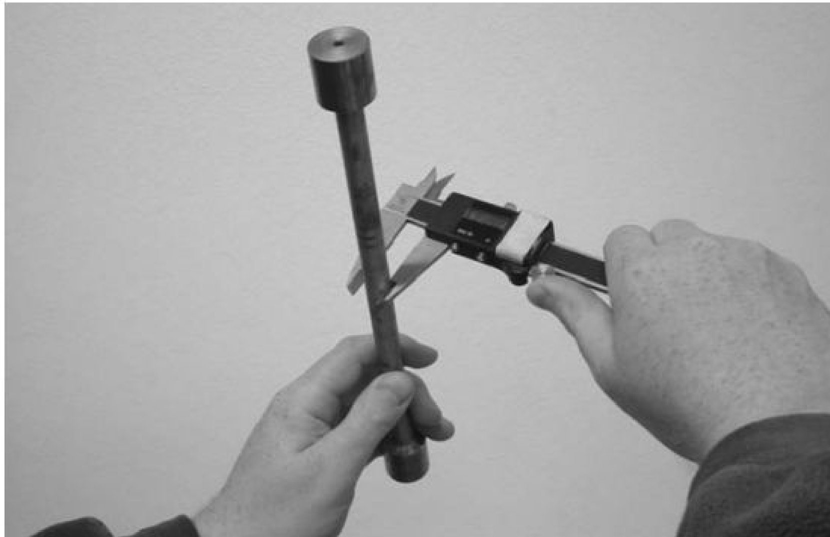


FIGURA A.10 Medida del diámetro de la probeta con un calibre.

tiene que ser al menos igual a la longitud de la galga más dos a cuatro veces el diámetro.

Procedimiento de prueba

1. Medir el diámetro (y el espesor en el caso de probetas tubulares) (Figura A.10).
2. Colocar la probeta en la máquina de pruebas de torsión prestando especial atención a la alineación y aplicar un par (Figura A.11).
3. Medir simultáneamente el par y el ángulo de torsión, y anotar los datos.
4. Mantener la velocidad de prueba lo suficientemente alta como para que la reptación sea despreciable.

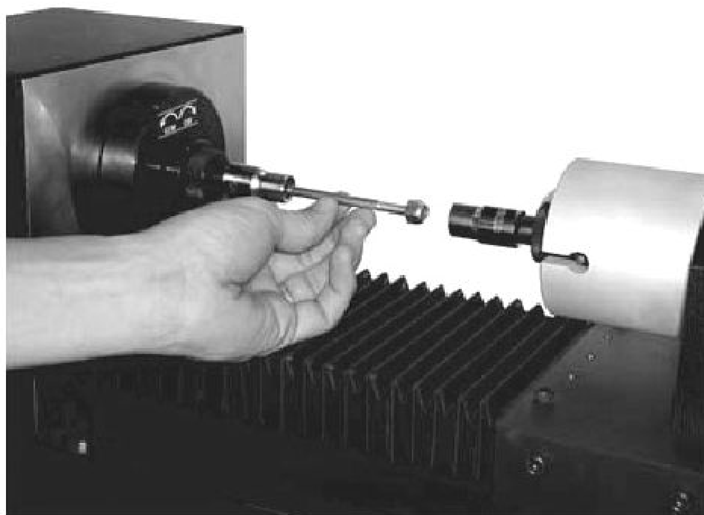


FIGURA A.11 Colocación de la probeta en la máquina de pruebas de torsión.

Análisis y resultados

- Calcule el esfuerzo máximo de torsión (τ_{max}) y la deformación de torsión (γ) utilizando las fórmulas

  $\tau_{max} = Tr/J$

  $\gamma = \theta r/L$

  donde

  T = Par
  r = Radio
  J = Momento de inercia polar de la probeta alrededor de su centro
  θ = Ángulo de torsión en radianes
  L = Longitud nominal.

- Dibuje una gráfica del esfuerzo de torsión en función de la deformación de torsión, como el mostrado en la Figura 3.16.
- Determine el módulo de rigidez G como la pendiente de la parte recta del diagrama esfuerzo–deformación para torsión.

  $G = \tau_{max}/\gamma$

Informe

- Gráfica del esfuerzo de torsión en función de la deformación de torsión.
- Módulo de rigidez.

Experimento 4

Prueba de impacto del acero

Designación ASTM

ASTM E23: *Tests Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* (Métodos de ensayo para pruebas de impacto en barras de materiales metálicos con muescas).

Propósito

Determinar la energía absorbida al romper probetas de acero con muescas a diferentes temperaturas, utilizando la prueba de impacto con péndulo de Charpy. El valor de la energía es una medida de la tenacidad del material.

Significado y uso

Este ensayo mide la variación de la tenacidad de una probeta cuando varía la temperatura.

Aparato

Utilice una máquina para pruebas de impacto de tipo péndulo de construcción rígida y y con una capacidad más que suficiente como para romper la probeta con un único golpe (Figuras A.12 y 3.19).

Probetas de ensayo

Probetas de acero preparadas según la especificación ASTM E23, como se muestra en la Figura 3.18.

Condiciones de prueba

La prueba puede realizarse para las siguientes cuatro temperaturas:

- −40°C (−40°F) (hielo seco + alcohol isopropileno) (alcohol seco).
- −18°C (0°F) (hielo seco + 30% de alcohol isopropileno + 70% de agua).
- 4°C (40°F).
- 40°C (104°F) (horno).

Procedimiento de prueba

1. Preparar la máquina para pruebas de impacto alzando el péndulo y ajustando a cero la lectura de la galga. Dado que el péndulo es pesado, debe manipularse tomando las adecuadas medidas de seguridad.



FIGURA A.12 Máquina de prueba de impacto con péndulo de Charpy.

2. Extraer la probeta del medio fijador de la temperatura (Figura A.13) utilizando unas tenazas y colocarla inmediatamente sobre los dos soportes de la máquina para pruebas de impacto, como se muestra en la Figura A.14.
3. Liberar el péndulo sin producir vibraciones pulsando el botón correspondiente. El tiempo transcurrido entre la extracción de la probeta del medio fijador de la temperatura y el instante de terminación de la prueba debe ser menor de cinco segundos.
4. Anotar el valor de la energía necesaria para romper la probeta leyendo la marca de la galga.
5. Observar la apariencia de la superficie de la fractura (Figura 3.20).
6. Medir la expansión lateral de la probeta utilizando un calibre o la galga de expansión lateral especificada en ASTM E23.

Informe

- Diagrama de la energía necesaria para provocar la fractura en función de la temperatura.
- Temperatura de transición de dúctil a frágil.
- Apariencia de la superficie de fractura (para cada probeta y temperatura).

■ Expansión lateral (para cada probeta y temperatura).



FIGURA A.13 Probetas de Charpy sumergidas en hielo seco y alcohol isopropileno.

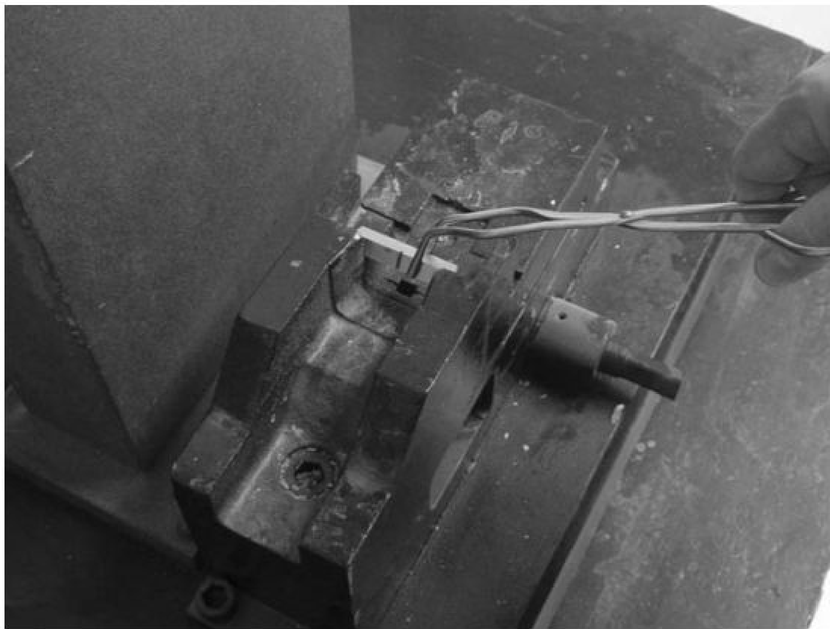


FIGURA A.14 Colocación de la probeta en la máquina de Charpy.

Experimento 5

Inspección microscópica de materiales

Designación ASTM

Ninguna.

Propósito

- Observar las características microestructurales de los materiales.
- Comparar la microestructura de distintos materiales.
- Comparar metales sometidos a distintos tratamientos térmicos.
- Observar los contornos de grano de los metales.
- Examinar superficies fracturadas.
- Observar microfisuras en el hormigón (Figura A.15).
- Observar las fibras en el hormigón reforzado con fibras.
- Observar las propiedades microscópicas del hormigón asfáltico.
- Observar los gránulos de la madera, etc.

Aparato

Microscopio óptico (Figura A.16) o microscopio electrónico de barrido.

Material

Pueden utilizarse distintos materiales, tales como metales, hormigón de cemento portland, hormigón asfáltico o madera.

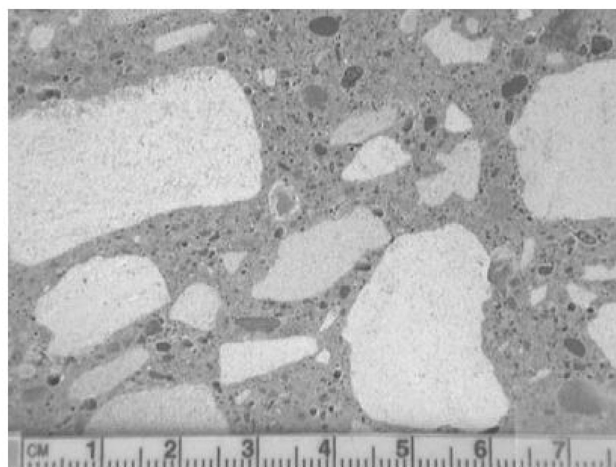


FIGURA A.15 Microestructura del hormigón utilizando un microscopio óptico.



FIGURA A.16 Examen de una probeta de hormigón con un microscopio óptico.

Informe

Comparar y citar las características microestructurales de los materiales.

Experimento 6

Análisis granulométrico de áridos

Designación ASTM

ASTM C136: *Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates* (Análisis granulométrico de áridos finos y gruesos).

Propósito

Determinar la distribución de tamaños de las partículas de áridos finos y gruesos mediante tamizado en seco.

Significado y uso

Esta prueba permite determinar la calidad de los materiales que vayan a ser utilizados como áridos. Garantiza que la distribución de tamaños de las partículas cumple los requisitos aplicables y proporciona los datos necesarios para controlar el material de diversos productos áridos y de mezclas que contengan áridos. Los datos también pueden resultar útiles para desarrollar relaciones relativas a la porosidad y el grado de empaquetamiento.

Aparatos

- Balanzas o básculas con una precisión mínima de 0,5 g para el árido grueso y de 0,1 para el árido fino.
- Cedazos.
- Vibrador de cedazos mecánico (Figuras A.17, A.18 y 5.10).
- Horno capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5°C (230 ± 9°F).
- Divisor de muestras de áridos para reducir la cantidad de material a la necesaria para llevar a cabo el análisis granulométrico (Figura 5.17).

Probetas de ensayo

Mezclar completamente la muestra de áridos y reducirla a una cantidad adecuada para realizar el ensayo, utilizando un divisor de muestras o mediante una división en cuartos. El tamaño mínimo de muestra deberá ser el indicado en la tabla de la página siguiente.

Procedimiento de prueba

1. Secar la muestra de ensayo de árido hasta obtener un peso constante a una temperatura de 110 ± 5°C y a continuación enfriarla a temperatura ambiente.
2. Seleccionar los tamaños de cedazo adecuados para obtener la información requerida por las especificaciones que debe cumplir el material que se va a probar. Los

	Masa mínima, kg
Árido fino con al menos un 95% que pasa por el cedazo de 2,36 mm (Nº 8)	0,1
Árido fino con al menos un 85% que pasa por el cedazo de 4,75 mm (Nº 4)	0,5
Árido grueso con tamaño nominal máximo de 9,5 mm (3/8")	1
Árido grueso con tamaño nominal máximo de 12,5 mm (1/2")	2
Árido grueso con tamaño nominal máximo de 19,0 mm (3/4")	5
Árido grueso con tamaño nominal máximo de 25,0 mm (1")	10
Árido grueso con tamaño nominal máximo de 37,5 mm (1-1/2")	15



FIGURA A.17 Vibrador de cedazos de sobremesa y cedazos.

tamaños de cedazo comunes, en milímetros, son: 37,5; 25; 19; 12,5; 9,5; 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 y 0,075 mm (1-1/2, 1, 3/4, 1/2 y 3/8 pulgadas, Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100 y Nº 200).

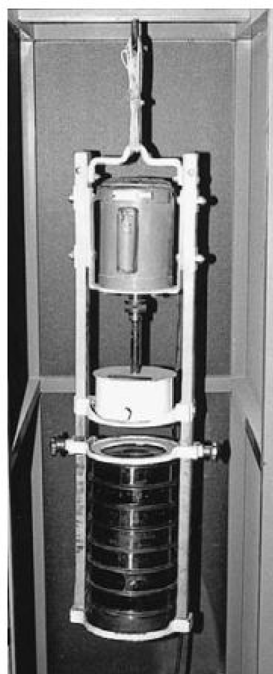


FIGURA A.18 Vibrador de cedazos colgante y cedazos para muestras pequeñas de áridos.

3. Colocar los cedazos en orden de tamaño decreciente y abertura, y colocar la muestra de áridos en el cedazo superior (Figura A.19).
4. Agitar los cedazos manualmente o utilizando un aparato mecánico durante un periodo de tiempo suficiente. El criterio para establecer el tiempo de tamizado es: una vez terminado, no más del 1% del residuo en cada cedazo individual pasará por dicho cedazo durante un minuto de tamizado manual continuo.
5. Determinar el peso de cada uno de los sucesivos tamaños (Figura A.20).
6. El peso total del material después del tamizado deberá compararse con el peso original de la muestra colocada en los cedazos. Si las cantidades difieren en más de un 0,3%, basándose en el peso original de la muestra seca, los resultados no deben utilizarse con propósitos de aceptación.

Análisis y resultados

1. Calcule los porcentajes que pasan, los porcentajes totales de lo que queda retenido o los porcentajes de los diversos tamaños de las fracciones redondeados al 0,1%, basándose en el peso total de la muestra seca inicial.
2. Dibuje en papel semilogarítmico la distribución de tamaños de los gránulos (Figura A.21).
3. Dibuje la distribución de tamaños de los gránulos en una gráfica con el tamaño de cedazo elevado a 0,45 (Figura A.22).
4. Calcule el módulo de finura.



FIGURA A.19 Colocación de la muestra de áridos en los cedazos antes del tamizado.



FIGURA A.20 Pesado de los áridos retenidos en los cedazos.

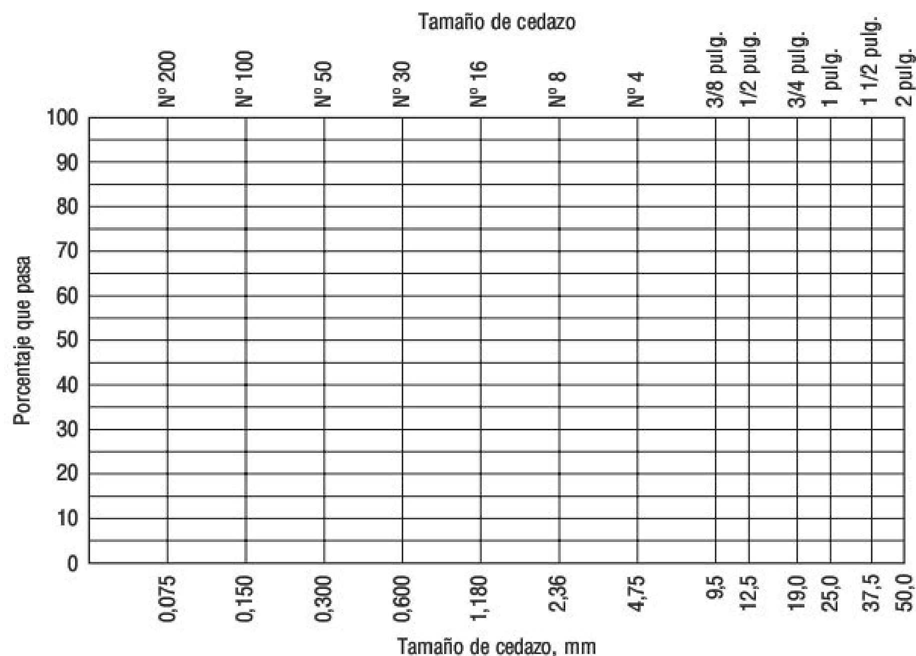


FIGURA A.21 Gráfica granulométrica de los áridos en papel semilogarítmico.

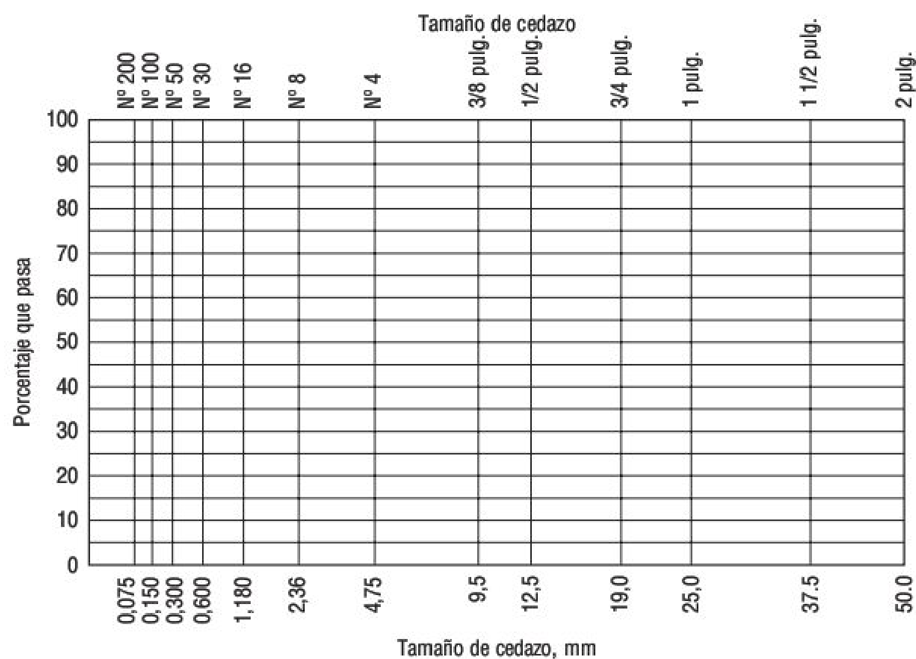


FIGURA A.22 Gráfica granulométrica elevada a 0,45.

Informe

- Porcentaje del material retenido entre cedazos consecutivos, porcentaje acumulado de material retenido en cada cedazo, o porcentaje del material que pasa cada cedazo. Proporcione los porcentajes redondeando al número entero más próximo, excepto si el porcentaje que pasa el cedazo de 0,075 mm (Nº 200) es inferior al 10%, en cuyo caso se redondea al múltiplo del 0,1% más próximo.
- Diagramas de la distribución de tamaños de gránulo, utilizando tanto gráficas semilogarítmicas como de potencia 0,45.
- Módulo de finura con una precisión del 0,01.

Experimento 7

Gravedad específica y absorción del árido grueso

Designación ASTM

ASTM C127: *Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate* (Gravedad específica y absorción del árido grueso).

Propósito

Determinar la gravedad específica y la absorción de áridos gruesos. La gravedad específica puede expresarse como gravedad específica en estado seco, gravedad específica en estado SSD o gravedad específica aparente.

Significado y uso

Generalmente, la gravedad específica en estado seco se utiliza para calcular el volumen ocupado por el árido en mezclas que contengan áridos, incluyendo hormigón de cemento portland, hormigón de materiales bituminosos y otras mezclas que se dosifiquen o analicen basándose en el volumen absoluto. La gravedad específica en estado SSD se utiliza si el árido está húmedo. Los valores de absorción se emplean para calcular la variación en peso del árido debida al agua absorbida en los espacios de los poros existentes dentro de las partículas constituyentes, en comparación con el estado seco.

Aparatos

- Balanza con una precisión igual al mayor de los dos valores siguientes: el 0,05% del peso de la muestra o 0,5 g.



FIGURA A.23 Cubo metálico y bidón de agua utilizados para determinar la gravedad específica en seco y la absorción de los áridos gruesos.

- Cubo de malla metálica de 3,35 mm (Nº 6) o más fino. Véase la Figura A.23.
- Bidón de agua.
- Cedazo de 4,75 mm (Nº 4) o de otro tamaño según sea necesario.

Probetas de ensayo

- Mezclar completamente la muestra de áridos y reducirla a la cantidad aproximada que se vaya a necesitar, utilizando un divisor de muestras o mediante la división en cuartos.
- Rechazar todos los materiales que pasen el cedazo de 4,75 mm mediante tamizado en seco y lavarlo para eliminar el polvo o cualquier otro recubrimiento de la superficie.
- El peso mínimo de probeta que se utilice dependerá del tamaño máximo nominal, como se indica a continuación:

Tamaño máximo nominal, mm	Peso mínimo, kg
12,5	2
19,0	3
25,0	4
37,5	5

Procedimiento de prueba

1. Sumergir el árido en agua a temperatura ambiente durante un periodo de 24 ± 4 horas.
2. Sacar la probeta de ensayo del agua y envolverla en una tela grande absorbente hasta eliminar todas las capas de agua visibles. Secar las partículas grandes de forma individual.
3. Pesar la muestra de ensayo en estado saturado con superficie seca (SSD) y anotar dicho peso como *B*. Redondear este peso y todos los siguientes al múltiplo más próximo del mayor de los dos siguientes valores: 0,5 g o el 0,05% del peso de la muestra.
4. Colocar la probeta en el cubo metálico y determinar su peso estando sumergida en agua a una temperatura de 23 ± 1,7°C, y anótelo como *C*. Asegurarse de eliminar todo el aire atrapado antes de pesarla agitando el contenedor con la probeta sumergida.
5. Secar la muestra de prueba hasta obtener un peso constante a una temperatura de 110 ± 5°C y pesarla. Anotar dicho peso como *A*.

Análisis y resultados

1. Gravedad específica en seco $= A/(B - C)$

donde

A = peso en el aire de la muestra secada al horno, g.
B = peso en el aire de la muestra en estado SSD, g.
C = peso en el agua de la muestra en estado saturado, g

2. Gravedad específica en seco (SSD) = $B/(B - C)$
3. Gravedad específica aparente = $A/(A - C)$
4. Absorción, % = $[(B - A)/A] \times 100$

Informe

- Gravedad específica en seco.
- Gravedad específica en estado SSD
- Gravedad específica aparente.
- Absorción.

Experimento 8

Gravedad específica y absorción de áridos finos

Designación ASTM

ASTM C128: *Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate* (Gravedad específica y absorción de áridos finos).

Propósito

Determinar la gravedad específica y la absorción de un árido fino. La gravedad específica puede expresarse como gravedad específica en seco, gravedad específica en estado SSD o gravedad específica aparente.

Significado y uso

Generalmente, la gravedad específica en estado seco se utiliza para calcular el volumen ocupado por el árido en mezclas que contengan áridos, incluyendo hormigón de cemento portland, hormigón de materiales bituminosos y otras mezclas que se dosifican y analizan basándose en el volumen absoluto.

Aparatos

- Balanza o báscula con una capacidad de 1 kg o más, con una sensibilidad de 0,1 g o menor y una precisión del 0,1% de la carga de prueba.
- Un picnómetro u otro contenedor adecuado en el que se pueda introducir fácilmente la muestra de ensayo de árido fino. Un matraz volumétrico de 500 cm^3 de capacidad con un picnómetro en la parte superior resulta adecuado para una muestra de prueba de 500 g del árido más fino (Figura A.24).
- Molde con forma de tronco de cono.
- Apisonador con una masa de 340 ± 15g.

Procedimiento de prueba

1. Medir el peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración. Anotar el peso como *B*.
2. Obtener aproximadamente 1 kg de muestra de árido fino.
3. Secar la muestra de áridos en una bandeja adecuada a una temperatura de 110 ± 5°C (230 ± 9°F) y dejarla enfriar; a continuación, cubrirla con agua, bien por inmersión o bien añadiendo al menos un 6% de humedad al árido fino y dejarlo reposar durante 24 ± 4 horas.
4. Decantar el agua en exceso con cuidado de no perder las partículas finas, extender la muestra sobre una superficie plana y no absorbente expuesta a una ligera corriente de aire templado y removerla frecuentemente para que el proceso de secado



FIGURE A.24 Molde, apisonador y matraz volumétrico utilizados para determinar la gravedad específica y la absorción de áridos finos.

sea homogéneo. Si se desea, puede emplearse ayuda mecánica, como por ejemplo secadoras o removedoras, con el fin de facilitar alcanzar el estado saturado con superficie seca. Continuar con esta operación hasta que la probeta de ensayo se aproxime a una condición que permita al material fluir libremente.

5. Colocar el molde firmemente sobre una superficie no absorbente y suave con el diámetro mayor en la parte inferior. Colocar una parte del árido fino parcialmente seco sin apretar en el molde, rellenándolo hasta que rebose y formando con las yemas de los dedos un montículo en la parte superior.
6. Apisonar ligeramente el árido fino dentro del molde dando 25 golpecitos con el apisonador. Cada golpe debe iniciarse a una distancia de aproximadamente 5 mm de la parte superior de la superficie del árido. Se debe dejar que el apisonador caiga libremente gracias a la acción de la gravedad.
7. Eliminar la arena suelta de la base y elevar el molde en sentido vertical. Si todavía hay humedad en la superficie, el árido fino conservará la forma del molde. Si este es el caso, hay que dejar que la arena se seque y repetir los pasos 4, 5 y 6 hasta que el árido se deslice ligeramente, lo que quiere decir que ha alcanzado la condición de superficie seca.
8. Pesar 500 $\pm$ 10 g de la muestra en estado SSD y anotarlo. Este será el peso S.
9. Llenar parcialmente el picnómetro con agua e introducir inmediatamente en él el árido en estado SSD pesado en el Paso 8. Añadir más agua al picnómetro hasta alcanzar aproximadamente el 90% de su capacidad. Invertir y agitar el picnómetro con el fin de eliminar todas las burbujas de aire. Llenar el picnómetro con agua hasta su capacidad calibrada.

10. Determinar el peso total del picnómetro, de la probeta y del agua y anotarlo como C.
11. Colocar con cuidado la muestra en una bandeja de secado. Introducirla en un horno a una temperatura de 110 ± 10°C hasta que se seque y adquiera un peso constante. Anote este peso como A.

Análisis y resultados

- Gravedad específica en seco = $A/(B + S - C)$

  donde

  A = peso en el aire de la probeta secada al horno, g
  B = peso del picnómetro lleno de agua, g
  S = peso de la probeta en estado SSD, g
  C = peso del picnómetro con probeta y agua hasta la marca de calibración, g

  Gravedad específica en seco (SSD) = $S/(B + S - C)$
  Gravedad específica aparente = $A/(B + A - C)$
  Absorción, % = $[(S - A)/A] \times 100$

Informe

- Gravedad específica en seco.
- Gravedad específica en estado SSD
- Gravedad específica aparente.
- Absorción.

Experimento 9

Peso específico en seco y huecos en los áridos

Designación ASTM

ASTM C29: *Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate* (Densidad en seco o peso específico y huecos existentes en los áridos).

Propósito

Determinar el peso específico en seco y los huecos existentes en los áridos tanto en estado suelto como compactado.

Significado y uso

La densidad en seco del árido es necesaria para establecer las proporciones en las mezclas de cemento portland. La densidad en seco también se puede utilizar para determinar las relaciones masa/volumen para las conversiones en los acuerdos de compra. El porcentaje de huecos entre las partículas de árido también se puede determinar basándose en la densidad en seco obtenida.

Aparatos

- Medida. Utilice un contenedor metálico rígido estanco con un volumen conocido. Se precisa un volumen mínimo de la medida para los distintos tamaños máximos nominales del árido grueso. Para un tamaño máximo nominal de árido de 25 mm (1 pulgada) se necesita una medida de volumen mínima de 0,0093 m^3 (9,3 litros).
- Balanza, varilla de apisonamiento, máquina de sacudidas o pala, y una placa de vidrio.

Procedimiento de prueba

1. Calibrar la medida de la forma siguiente:
   a. Llenar la medida con agua a temperatura ambiente y cubrirla con la placa de vidrio de tal forma que se eliminen las burbujas y el agua en exceso.
   b. Determinar la masa del agua contenida en la medida.
   c. Medir la temperatura del agua y determinar su densidad de acuerdo con la tabla de la página siguiente. Interpolar en caso necesario.
   d. Calcular el volumen de la medida dividiendo la masa del agua entre su densidad.
2. Llenar la medida con el árido y compactarlo, utilizando una varilla de apisonamiento (para áridos con un tamaño máximo nominal de 37,5 mm (1-1/2 pulg.) o menor), una máquina de sacudidas (para áridos con un tamaño máximo nominal comprendido entre 37,5 y 125 mm (1-1/2 y 5 pulgadas), o una pala (si se indica específicamente).

Temperatura		Densidad	
°C	°F	kg/m³	lb/pie³
15,6	60	999,01	62,366
21,1	70	997,97	62,301
26,7	80	996,59	62,216
29,4	85	995,83	62,166

a. Varilla de apisonamiento: llene la medida con el árido formando tres capas de aproximadamente el mismo volumen. Apisone cada capa de árido dando 25 golpes con la varilla de apisonamiento distribuidos uniformemente por toda la superficie (Figura A.25).
b. Máquina de sacudidas: llene la medida con el árido formando tres capas de aproximadamente el mismo volumen. Compacte cada capa colocando la medida sobre una base firme, elevando los lados opuestos alternativamente unos 50 mm (2 pulgadas) y dejando caer la medida 25 veces por cada lado.
c. Pala: llene la medida hasta que rebose utilizando una pala, descargando el árido desde una altura no mayor de 50 mm (2 pulgadas) respecto de la parte superior de la medida. Tenga cuidado para que no se produzca segregación.

3. Nivelar la superficie del árido con los dedos o con una regla. Determinar la masa neta del árido aproximando al múltiplo más próximo de 0,05 kg (0,1 libra) (Figura A.26).



FIGURA A.25 Apisonamiento del árido contenido en la medida.



FIGURA A.26 Pesado del árido.

Análisis y resultados

$$M = \frac{G - T}{V}$$

$$\%\text{Huecos} = \frac{(SW) - M}{SW} \times 100$$

donde

M = Peso específico en seco del árido, kg/m^3 (libra/pie^3)
G = Peso del árido más la medida, kg (lb)
T = Peso de la medida, kg (lb)
V = Volumen de la medida, m^3 (pie^3)
S = Gravedad específica en seco (ASTM C127 o C128)
P = Peso unitario del agua, 998 kg/m^3 (62,3 libra/pie^3)

Informe

- Peso específico en seco (o peso específico a granel en caso de emplear una pala), contenido de huecos y método de compactación.

Experimento 10

Asentamiento del hormigón de cemento portland mezclado fresco

Designación ASTM

ASTM C143: *Slump of Portland Cement Concrete* (Asentamiento del hormigón de cemento portland).

Propósito

Determinar el asentamiento del hormigón de cemento portland mezclado fresco tanto en el laboratorio como a pie de obra.

Significado y uso

Este método mide la consistencia del hormigón de cemento portland (PCC) mezclado fresco. En cierta medida, esta prueba indica la facilidad con la que se puede colocar y compactar el hormigón, es decir, su facilidad de trabajo. Esta prueba se utiliza tanto en el laboratorio como en la obra para el control de calidad.

Aparatos

- Molde con forma de cono truncado con un diámetro superior de 102 mm (4 pulgadas), un diámetro inferior de 203 mm (8 pulgadas) y una altura de 305 mm (12 pulgadas) (Figura 7.3).
- Varilla de apisonamiento con una longitud de 0,6 m (24 pulgadas), un diámetro de 16 mm (5/8 pulgadas) y extremos redondeados.

Procedimiento de prueba

1. Mezclar el hormigón manualmente o con una mezcladora mecánica (Figura A.27). Si se obtiene una cantidad grande de hormigón mezclado, separar una muestra representativa.
2. Humedecer el molde y colocarlo con su base mayor sobre una superficie plana, húmeda, rígida y no absorbente.
3. Mantener el molde firmemente en su sitio pisando sobre las dos aletas.
4. Llenar inmediatamente el molde formando tres capas, ocupando cada una de ellas aproximadamente un tercio del volumen del molde. Tenga en cuenta que un tercio del volumen es equivalente a una altura de 67 mm (2-5/8 pulgadas) y dos tercios del volumen es equivalente a 155 mm (6-1/8 pulgadas).
5. Apisonar cada capa dando 25 golpes con la varilla de apisonamiento (Figura A.28). Distribuir uniformente los golpes sobre la sección transversal de cada capa. Apisonar la segunda capa y la capa superior en toda su profundidad, de modo que



FIGURA A.27 Mezclado del hormigón en una mezcladora.



FIGURA A.28 Apisonamiento del hormigón fresco en el cono de asentamiento con una varilla de apisonamiento.

los golpes penetren en la capa subyacente. Al rellenar y compactar la capa superior, asegúrese de que el hormigón forme un montículo sobre el molde antes de comenzar a introducir la varilla. Si la operación de apisonamiento hace que el nivel de hormigón descienda por debajo del borde superior del molde, añadir más hormigón con el fin de mantener continuamente un exceso de hormigón por encima de la parte superior del molde.

6. Una vez apisonada la capa superior, nivelar la superficie del hormigón enrasándola con un movimiento giratorio de la varilla de apisonamiento.
7. Quitar el molde inmediatamente del hormigón elevándolo con cuidado y sin hacer movimientos laterales o rotatorios. La prueba de asentamiento debe completarse en los 2,5 minutos siguientes a la toma de la muestra.
8. Medir el asentamiento determinando la diferencia en vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la parte superior de la probeta, como se muestra en la Figura A.29. Si en dos ensayos consecutivos sobre una muestra de hormigón, una parte del hormigón resbala o se desprende de la masa de la probeta, probablemente el hormigón no tiene la plasticidad ni la cohesión necesarias para llevar a cabo el ensayo de asentamiento y, por tanto, los resultados no serán válidos.

Informe

- El valor del asentamiento aproximado a un múltiplo de 5 mm (1/4 pulgadas).



FIGURA A.29 Medida del asentamiento del hormigón mezclado fresco.

Experimento 11

Peso específico y fluencia del hormigón mezclado fresco

Designación ASTM

ASTM C138: *Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete* (Peso específico, fluencia y contenido de aire (gravimetría) del hormigón).

Propósito

Determinar el peso específico, la fluencia, el contenido de cemento y el contenido de aire del hormigón de cemento portland mezclado fresco. La fluencia se define como el volumen de hormigón producido a partir de una mezcla de cantidades conocidas de los materiales componentes.

Significado y uso

El valor del peso específico se utiliza para calcular el volumen de hormigón de cemento portland producido a partir de una mezcla cuya cantidad es conocida.

Aparatos

- Medida. Utilice un contenedor de metal rígido estanco de volumen conocido. Se precisa un volumen mínimo de la medida para los distintos tamaños máximos nominales del árido grueso. Para un tamaño máximo nominal del árido de 25 mm (1 pulgada), la medida mínima de volumen requerida es de 6 litros (0,2 pie^3).
- Balanza, varilla de apisonamiento, vibrador interno (opcional), paleta de enrasar y maza.

Procedimiento de prueba

1. Disponer el hormigón mezclado fresco en la medida formando tres capas con aproximadamente el mismo volumen.
2. Apisonar cada capa dando 25 golpes con la varilla de apisonamiento si se utiliza una medida de 0,014 m^3 (0,5 pie^3) o menor; en caso contrario, deben darse 50 golpes por capa. Los golpes deben distribuirse uniformemente por la sección transversal de la medida. Al compactar la capa inferior, haga que la varilla la atraviese en toda su profundidad, pero procurando no golpear en exceso la parte inferior de la medida. Para las dos capas superiores, penetrar unos 25 mm (1 pulgada) en la capa situada debajo.
3. Golpear suavemente los laterales de la medida de forma rápida entre 10 y 15 veces con la maza para eliminar las burbujas de aire atrapado.
4. Se puede utilizar un vibrador interno en lugar de la varilla de apisonamiento. En este caso, el hormigón se coloca y se le hace vibrar en la medida dispuesto en dos capas aproximadamente iguales.



FIGURA A.30 Pesado del hormigón contenido en la medida.

5. Una vez completada la consolidación, la medida no debe contener una cantidad en exceso sustancial ni una falta excesiva de hormigón. Se puede añadir una pequeña cantidad de hormigón para corregir la falta de material.
6. Después de la consolidación, enrasar la superficie superior del hormigón y acabarla con la paleta de enrasar teniendo cuidado de dejar la medida completamente llena.
7. Después del enrasado, limpiar todo el hormigón sobrante que haya en la parte exterior de la medida y determinar el peso neto del hormigón contenido en la medida (Figura A.30).

Análisis y resultados

- W = (peso neto del hormigón)/(volumen de la medida)
- $Y\,(\text{m}^3) = W_1/W$

  $Y\,(\text{pie}^3) = W_1/W$

  $Y\,(\text{yd}^3) = W_1/(27W)$
- $R_y = Y/Y_d$
- $N = N_t/Y$
- $A = [(T - W)/T] \times 100$

donde

W = peso específico del hormigón, kg/m^3 (libra/pie^3)
Y = fluencia = volumen de hormigón producido por lote, m^3 (yd^3)
Y_f = fluencia = volumen de hormigón producido por lote, pie^3
W_1 = peso total de todos materials del lote, kg (lb)
R_y = fluencia relativa
Y_d = volumen de hormigón que el lote estaba diseñado para producir, m^3 (yd^3)
N = contenido real de cemento, kg/m^3 (libra/pie^3)
N_t = peso de cemento del lote, kg (libra)
A = contenido de aire (porcentaje de huecos) en el hormigón.
T = peso específico teórico del hormigón calculado al aire, kg/m^3 (libra/pie^3)

Informe

- El peso específico, la fluencia, la fluencia relativa, el contenido real de cemento y el contenido de aire.

Experimento 12

Contenido de aire del hormigón mezclado fresco por el método de presión

Designación ASTM

ASTM C231: *Air Content of Freshly Mixed Concrete by Pressure Method* (Contenido de aire del hormigón de cemento portland mezclado fresco por el método de presión).

Propósito

Determinar el contenido de aire del hormigón de cemento portland mezclado fresco por el método de presión.

Significado y uso

El contenido de aire desempeña un papel importante en la facilidad de trabajo del hormigón mezclado fresco y en la resistencia y la durabilidad del hormigón endurecido. El contenido de aire del hormigón mezclado fresco es necesario para establecer las proporciones correctas de la mezcla del hormigón.

Aparatos

- Un medidor de aire de tipo B, formado por un cubeta de medida con una capacidad de al menos 0,006 m^3 (0,2 pie^3) y una tapa de cierre equipada con válvulas de aire, válvulas de sangrado de aire, llaves de purga y bomba manual, como se muestra en la Figura 7.11. El medidor de aire debe calibrarse con frecuencia de acuerdo con el procedimiento ASTM C231, con el fin de garantizar unas medidas correctas.
- Diversos elementos, incluyendo una llana, una varilla de apisonamiento, una maza y una enrasadora.

Procedimiento de prueba

1. Colocar una muestra representativa de hormigón plástico en la cubeta de medida en tres capas iguales.
2. Consolidar cada capa de hormigón dando 25 golpes con la varilla de asentamiento, distribuyendo uniformemente los golpes sobre la sección transversal.
3. Una vez apisonadas cada una de las capas, golpear los laterales de la cubeta de medida entre 10 y 15 veces con la maza para eliminar los huecos.
4. Nivelar la superficie superior deslizando la varilla por el borde superior haciendo un movimiento de aserrado.
5. Limpiar a fondo los bordes, colocar la tapa y cerrar herméticamente.

6. Con una jeringuilla de plástico, inyectar agua a través de una de las llaves de purga hasta que el agua salga por la llave de purga opuesta.
7. Golpear el medidor con cuidado hasta que salga todo el aire por la misma llave de purga.
8. Bombear aire al interior de la cámara hasta que el indicador de la galga se sitúe en la línea inicial.
9. Abrir la válvula de aire situada entre la cámara de aire y la cubeta de medida.
10. Dar unos firmes golpecitos con las manos en los laterales de la cubeta de medida y golpear también ligeramente el manómetro.
11. Leer el porcentaje del contenido de aire en la galga (Figura A.31).
12. Determinar el factor de corrección del árido de acuerdo con el procedimiento ASTM C231 y restarlo de la lectura obtenida en el Paso 11.

Informe

- El contenido de aire y el método utilizado (método de presión).



FIGURA A.31 Lectura del medidor de presión.

Experimento 13

Contenido de aire del hormigón mezclado fresco por el método volumétrico

Designación ASTM

ASTM C173: *Air Content of Freshly Mixed Concrete by Volumetric Method* (Contenido de aire del hormigón mezclado fresco por el método volumétrico).

Propósito

Determinar el contenido de aire del hormigón de cemento portland mezclado fresco por el método volumétrico.

Significado y uso

El contenido de aire desempeña un papel importante en la facilidad de trabajo del hormigón mezclado fresco y en la resistencia y la durabilidad del hormigón endurecido. El contenido de aire del hormigón mezclado fresco es necesario para establecer las proporciones correctas de la mezcla de hormigón.

Aparatos

- Un medidor de aire que consta de una cubeta y una sección superior como la mostrada en la Figura 7.12
- La cubeta tiene un diámetro de una a 1,25 veces la altura y una capacidad mínima de 0,002 m^3 (0,075 pie^3). La capacidad de la sección superior es 1,2 veces la capacidad de la cubeta.
- Diversos elementos, incluyendo un embudo, una varilla de apisonamiento, una barra de enrasar, un cazo de medida, una jeringuilla, una vasija, una llana, una pala, alcohol de isopropileno y una maza.

Calibración

1. El volumen de la cubeta debe calibrarse pesando de forma precisa la cantidad de agua necesaria para llenarla a temperatura ambiente y dividiendo ese peso entre el peso específico del agua a la misma temperatura.
2. La exactitud de la graduación en el cuello de la sección superior y el volumen del cazo de medida deben calibrarse de acuerdo con el procedimiento ASTM C173.

Procedimiento de prueba

1. Llenar la cubeta con hormigón mezclado fresco disponiéndolo en tres capas de la misma altura.

2. Apisonar cada capa 25 veces con la varilla de apisonamiento.
3. Una vez apisonadas cada una de las capas entre 10 y 15 veces, golpear los laterales de la cubeta de medida con la maza para eliminar las burbujas de aire.
4. Después de colocar la tercera capa de hormigón, eliminar el exceso de hormigón con la barra de enrasar hasta que la superficie coincida con la parte superior de la cubeta. Limpie los restos de hormigón que queden en el borde de la cubeta.
5. Fijar la sección superior sobre la cubeta, insertar el embudo y añadir agua hasta que aparezca en el cuello. A continuación, retirar el embudo y ajustar el nivel de agua utilizando la jeringuilla de plástico hasta que la parte inferior del menisco se nivele con la marca de cero. Introducir y apretar el tapón de rosca.
6. Invertir y agitar la unidad muchas veces hasta que el hormigón se asiente en la base.
7. Cuando todo el aire haya ascendido a la parte superior del aparato, quitar el tapón de rosca. Utilizando la jeringuilla, añadir cazos de medida de uno en uno con alcohol de isopropileno suficiente como para dispersar la masa espumosa de la superficie del agua. Observe que la capacidad del cazo es equivalente al 1,0% del volumen de la cubeta.
8. Anotar la lectura correspondiente al líquido contenido en el cuello de la parte inferior del menisco y aproximarla a un múltiplo de 0,1% (Figura A.32).
9. El contenido de aire porcentual se calcula a partir de la lectura obtenida en el Paso 8 más la cantidad de alcohol utilizada.

Informe

- El contenido de aire y el método utilizado (método volumétrico).



FIGURA A.32 Lectura del medidor de aire.

Experimento 14

Preparación y curado de probetas de hormigón

Designación ASTM

ASTM C31: *Making and Curing Concrete Test Specimens* (Preparación y curado de probetas de ensayo de hormigón).

Propósito

Determinar cómo preparar y curar probetas de hormigón de sección circular y rectangular.

Significado y uso

Esta práctica proporciona requisitos estandarizados para fabricar y curar probetas de ensayo de hormigón de cemento portland. Las probetas se pueden emplear para determinar la resistencia de la mezcla, para el control de calidad y para el aseguramiento de la calidad.

Aparatos

- Encofrados cilíndricos de acero o de otro material no absorbente y no reactivo. La probeta estándar utilizada para determinar la resistencia a la compresión del hormigón tiene un diámetro de 152 mm (6 pulgadas) y una altura de 304 mm (12 pulgadas) para un tamaño máximo de árido de hasta 50 mm (2 pulgadas). En ocasiones, se emplean probetas más pequeñas de diámetro igual a 102 mm (4 pulgadas) y una altura de 203 mm (8 pulgadas), pero este tamaño no se corresponde con los estándares ASTM.
- Encofrados de sección rectangular de acero o de otro material no absorbente y no reactivo. Pueden emplearse varios tamaños para fabricar probetas de tipo viga con una sección transversal rectangular y un vano de longitud igual a tres veces la longitud de la probeta. Las dimensiones internas del encofrado según el estándar ASTM son 152 × 152 mm (6 × 6 pulgadas) en la sección transversal y una longitud no menor de 508 mm (20 pulgadas), para un tamaño máximo del árido de hasta 50 mm (2 pulgadas).
- Varilla de apisonamiento con una longitud de 0,6 m (24 pulgadas), un diámetro de 16 mm (5/8 pulg.) y con los extremos redondeados.
- Una sala o recinto húmedo con no menos de una humedad relativa del 95% y una temperatura de 23 ± 1,7°C (73 ± 3°F), o un contenedor grande lleno de agua saturada de cal para el proceso de curado.
- Diversos elementos, incluyendo un vibrador (opcional), una pala y una llana.

Procedimiento de prueba

1. Pesar las cantidades requeridas de árido grueso, árido fino, cemento portland y agua.
2. Combinar los materiales en la mezcladora de tres a cinco minutos. Si se utiliza un aditivo, deberá mezclarse con agua antes de añadirlo a los demás materiales.
3. Comprobar el asentamiento, el contenido de aire y la temperatura del hormigón.
4. Para probetas cilíndricas, colocar el hormigón en el encofrado usando una pala o una llana. Rellenar el cilindro formando tres capas iguales y apisonar cada una de ellas 25 veces. Golpear la parte exterior del cilindro entre 10 y 15 veces después de haber apisonado cada capa. Nivelar la parte superior e igualar la superficie. También se pueden utilizar vibradores en lugar de varillas de apisonamiento para consolidar el hormigón. La vibración es opcional si el asentamiento está entre 25 mm y 75 mm (1 y 3 pulgadas) y es obligatorio si el asentamiento es menor de 25 mm (1 pulgada) (Figuras A.33–A.35).
5. En el caso de las probetas de tipo viga, engrasar los laterales del encofrado y rellenar los encofrados con hormigón en dos capas. Consolidar el hormigón apisonando cada capa 60 veces hasta obtener una distribución uniforme o bien mediante vibración. Una vez completada la consolidación, acabar la superficie nivelándola y dándola una apariencia uniforme.



FIGURA A.33 Preparación de probetas cilíndricas y de tipo viga.



FIGURA A.34 Relleno y apisonamiento del hormigón en probetas de tipo viga.



FIGURA A.35 Consolidación del hormigón en un encofrado de viga utilizando un vibrador externo.

6. Cubrir el encofrado con un paño húmedo para impedir la evaporación.
7. Retirar los encofrados entre 16 y 32 horas después.
8. Curar la probeta en una sala o recinto húmedo donde exista una humedad relativa no inferior al 95% y a una temperatura de 23 ± 1,7°C (73 ± 3°F) o mediante inmersión en agua saturada de cal a la misma temperatura (Figura A.36).

Precauciones

1. Debe evitarse que se produzca segregación. Una vibración excesiva puede dar lugar a este efecto.
2. Al colocar la capa final, el operador debe tratar de añadir una cantidad de hormigón que se ajuste de forma exacta al encofrado después de la compactación. No debe añadirse hormigón no representativo a un encofrado que no esté completamente lleno.
3. Debe evitarse el hormigón sobresalga del encofrado más de 6 mm (1/4 pulg.).

Informe

- Indique los pesos de la mezcla, el asentamiento, la temperatura de la mezcla y el contenido de aire.
- Detalle el tipo de probeta utilizada, el número de probetas, las dimensiones y cualquier desviación respecto del procedimiento de preparación estándar.
- Incluya esta información junto con el informe sobre la resistencia del hormigón.



FIGURA A.36 Curado de las probetas cilíndricas del hormigón en agua saturada de cal.

Experimento 15

Refrentado de probetas cilíndricas de hormigón con azufre o un compuesto de recubrimiento

Designación ASTM

ASTM C617: *Capping Cylindrical Concrete Specimens* (Refrentado de probetas cilíndricas de hormigón).

Propósito

Refrentar probetas cilíndricas de hormigón de cemento portland endurecido y los testigos perforados en el hormigón con mortero de azufre u otro compuesto de recubrimiento para preparar la probeta para el ensayo de resistencia a la compresión.

Significado y uso

Este procedimiento proporciona superficies planas perpendiculares al eje de la probeta en los extremos de los cilindros de hormigón, antes de realizar el ensayo de compresión.

Aparatos

- Dispositivo de alineación formado por un bastidor con guías y una cubeta, como el mostrado en la Figura A.37. El tamaño del dispositivo de alineación debe corresponderse con el tamaño de la probeta.



FIGURA A.37 Refrentado de una probeta cilíndrica de hormigón con un dispositivo de alineación.

- Caldera de fusión, utilizada para fundir los morteros de azufre o los compuestos de recubrimiento, equipada con un control automático de temperatura. La caldera de fusión debe emplearse en el exterior o bajo una campana de evacuación de humos. El calentamiento mediante llama es peligroso, ya que la mezcla puede entrar en combustión si se sobrecalienta.

Procedimiento de recubrimiento

1. Preparar el mortero de azufre o el compuesto de recubrimiento calentándolo a aproximadamente 130°C (265°F). Utilizar un termómetro de metal para comprobar la temperatura. Asegurarse de eliminar cualquier resto de mortero antiguo y de utilizar un mortero nuevo para evitar la pérdida de resistencia a causa de calentamientos sucesivos. El mortero de azufre fresco tiene que estar seco al introducirlo en la caldera, ya que la humedad puede producir espuma.
2. Calentar la cubeta o el dispositivo de recubrimiento ligeramente antes de utilizarlo para ralentizar la velocidad de endurecimiento y permitir la producción de capas delgadas de recubrimiento.
3. Engrasar ligeramente el dispositivo de refrentado y remover el mortero de azufre fundido o el compuesto de recubrimiento inmediatamente antes de verterlo en la cubeta. Asegúrese de que los extremos de las probetas curadas están lo suficientemente secos en el momento de refrentarlos, de manera que no se forman bolsas de espuma o vapor.
4. Sujetar la probeta de hormigón con las dos manos y empujarla para introducirla por las guías del dispositivo de refrentado. Empujar hacia abajo con cuidado la probeta hasta que descanse sobre la cubeta (Figura A.37). Este paso debe realizarse rápidamente antes de que el azufre o el compuesto de recubrimiento se solidifique. El espesor del recubrimiento deberá ser de aproximadamente 3 mm (1/8 pulg.) y nunca mayor de 8 mm (5/16 pulg.) en ninguna zona.
5. Antes de realizar la prueba de resistencia a la compresión, el recubrimiento debe curarse para obtener una resistencia comparable a la del hormigón.

Experimento 16

Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón

Designación ASTM

ASTM C39: *Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens* (Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón).

Propósito

Determinar la resistencia a la compresión de probetas de hormigón de cemento portland cilíndricas, como cilindros encofrados y testigos perforados.

Significado y uso

Este ensayo proporciona la resistencia a la compresión del hormigón, parámetro universalmente utilizado como medida de la calidad del hormigón.

Aparato

Máquina de carga con dos bloques separados de acero endurecido. El bloque superior tiene una superficie de asentamiento esférica y el bloque inferior es una superficie plana (Figura A.38).

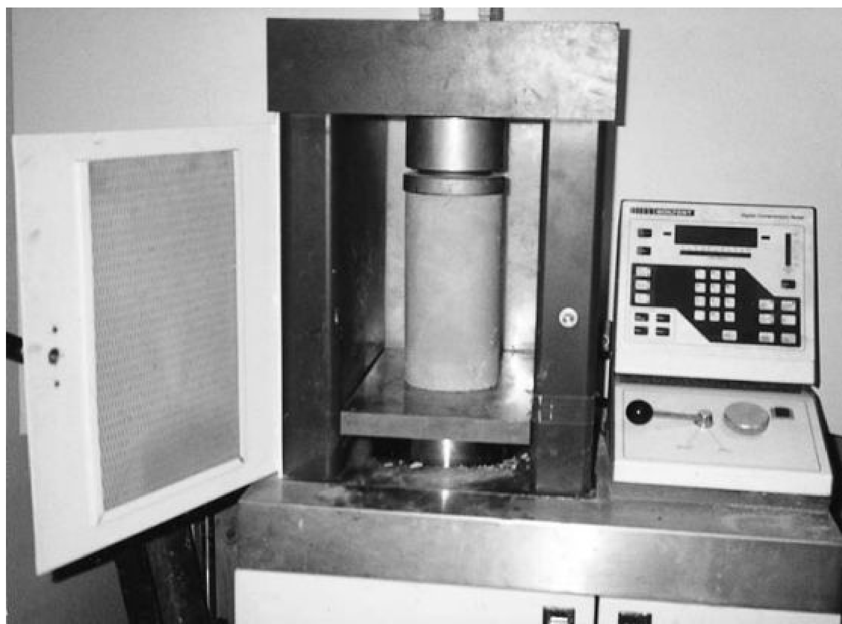


FIGURA A.38 Probeta cilíndrica de hormigón para determinar la resistencia a la compresión.

Probetas de ensayo

- La probeta estándar utilizada para determinar la resistencia a la compresión del hormigón tiene un diámetro de 152 mm (6 pulg.) y una altura de 304 mm (12 pulg.) para un tamaño máximo de árido de hasta 50 mm (2 pulg.). En ocasiones, se emplean probetas más pequeñas con un diámetro de 102 mm (4 pulg.) y una altura de 203 mm (8 pulg.), pero no están estandarizadas por ASTM.
- Llevar a cabo la prueba de compresión directamente sobre las probetas curadas después de sacarlas de la sala de curado. Las probetas de ensayo deben estar húmedas en el momento de realizar el ensayo.
- Ninguno de los extremos de la probeta sometida a la prueba de compresión debe alejarse de la perpendicular más de 0,5°, aproximadamente 3 mm cada 0,3 m (1/8 de pulgada en 12 pulgadas).
- Si los extremos de la probeta no son planos con una tolerancia de 0,05 mm (0,002 pulg.), deben refrentarse con azufre o con un compuesto de recubrimiento. Pueden utilizarse recubrimientos de neopreno (Figura A.39), aunque no son estándar en ASTM.
- La edad de la probeta en el momento de realizar la prueba tiene que ser 24 ± 0,5 horas; 3 días ± 2 horas; 7 días ± 6 horas; 28 días ± 20 horas o 90 días ± 2 días.

Procedimiento de prueba

1. Medir el diámetro de la probeta de ensayo y aproximarlo a un múltiplo de 0,25 mm (0,01 pulg.), promediando dos diámetros medidos en ángulo recto entre sí a la mitad de altura de la probeta.
2. Ajustar los bloques de soporte en su posición.



FIGURA A.39 Recubrimientos de neopreno utilizados para refrentar una probeta cilíndrica de hormigón.

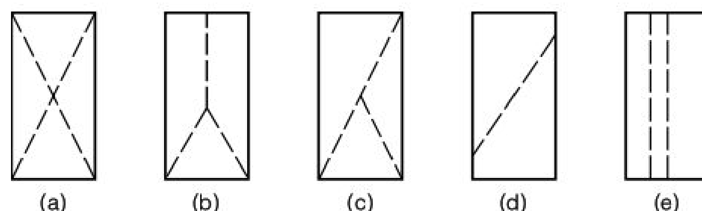


FIGURA A.40 Tipos de fractura de las probetas cilíndricas de hormigón: (a) cono, (b) cono y partición, (c) cono y cortante, (d) cortante y (e) en columna.

3. Limpiar las caras de los bloques de soporte y la probeta.
4. Alinear con cuidado el eje de la probeta con el centro del émbolo del bloque con asentamiento esférico.
5. Aplicar la carga de forma continua y sin sacudidas. En máquinas de tipo tornillo, utilice una velocidad de carga de 1,25 mm/min (0,05 pulg./min). En máquinas hidráulicas, aplique la carga a una velocidad constante dentro del rango de 138 kPa/s a 335 kPa/s (20 psi/seg a 50 psi/seg). Durante la primera mitad de la fase de carga anticipada es posible aplicar una velocidad de carga mayor. No debe realizarse ningún ajuste en los controles de la máquina de prueba mientras la probeta se está deformando rápidamente, inmediatamente antes de la fractura.
6. Continuar aplicando la carga hasta que la probeta se fracture.
7. Anotar la carga máxima soportada por la probeta durante el ensayo.
8. Observar el tipo de fractura y la apariencia del hormigón (Figura A.40).

Análisis y resultados

- Calcule la resistencia a la compresión como sigue

$$f'_c = P_{max}/A$$

donde

f'_c = resistencia a la compresión, MPa (psi)
P_{max} = carga máxima aplicada, N (libras)
A = área de la sección transversal, mm^2 ($pulg.^2$)

Informe

- Número de identificación de la probeta.
- Diámetro (y longitud si está medida no pertenece al rango comprendido entre 1,8 a 2,2 veces del valor del diámetro).
- Área de la sección transversal.
- Carga máxima.
- Resistencia a la compresión, aproximando a un múltiplo de 0,07 MPa (10 psi).
- Tipo de fractura, si es distinta de las usuales.
- Defectos en la probeta o en los recubrimientos.
- Edad de la probeta.

Experimento 17

Resistencia a la flexión del hormigón

Designación ASTM

ASTM C78: *Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)* [Resistencia a la flexión del hormigón utilizando el método de carga por tercios].

Propósito

Determinar la resistencia a la flexión del hormigón de cemento portland utilizando el método de carga por tercios.

Significado y uso

La resistencia a la flexión del hormigón es una medida de la calidad del hormigón.

Aparatos

- Máquina de carga capaz de aplicar cargas a una velocidad constante.
- Dispositivo de carga capaz de aplicar una configuración de carga como se muestra en la Figura 7.32. Las fuerzas aplicadas a la probeta de sección transversal será perpendicular a la misma y se aplicará sin descentramiento.

Probetas de ensayo

- Las probetas estándar de acuerdo con ASTM tienen una sección transversal de 152 mm × 152 mm (6 × 6 pulgadas) y una longitud no menor que 508 mm (20 pulg.) para un tamaño máximo de árido de hasta 50 mm (2 pulg.).
- Los laterales de la probeta deben formar ángulo recto con las partes superior e inferior. Todas las superficies en contacto con los bloques de aplicación de la carga y de soporte deben ser uniformes y estar libres de defectos, sangrados, agujeros o identificaciones grabadas.

Procedimiento de prueba

1. Colocar la probeta de ensayo de lado con respecto a su posición normal en el encofrado y centrarla en los bloques de soporte.
2. Centrar el sistema de carga respecto a la fuerza aplicada. Poner en contacto los bloques de aplicación de la carga con la superficie de la probeta en los puntos de un tercio situados entre los soportes (Figura A.41).
3. Si no se obtiene un contacto completo sin carga entre la probeta y los bloques de aplicación de la carga y los soportes, de manera que haya un espacio de 25 mm (1

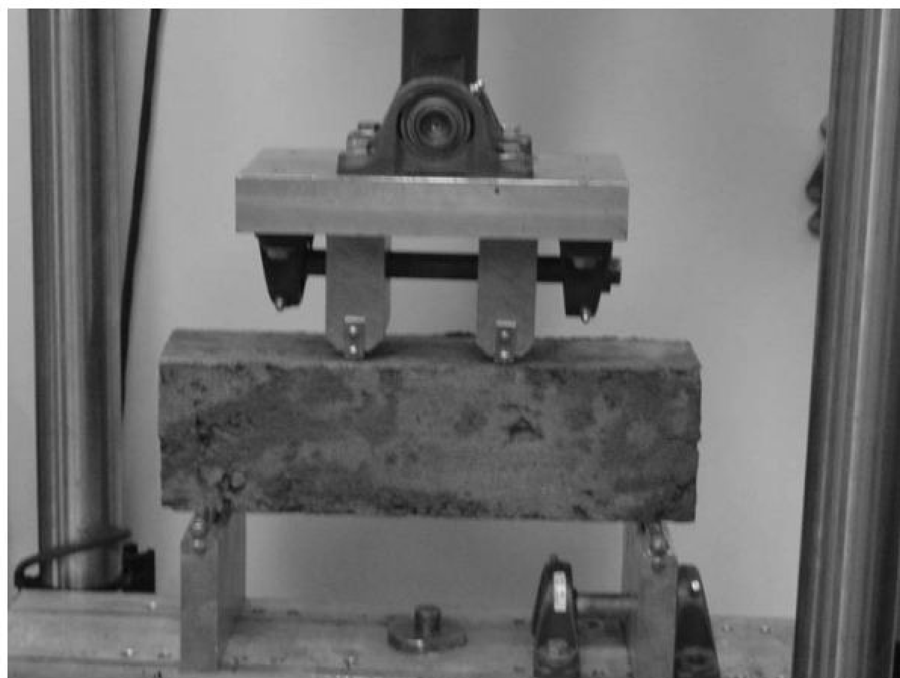


FIGURA A.41 Probeta de hormigón en la máquina de pruebas de flexión.

pulgada) o mayor con un hueco superior a 0,1 mm (0,004 pulg.), pulir o refrentar las superficies de contacto de la probeta o recubrir con tiras de cuero.

4. Aplicar la carga rápidamente hasta alcanzar aproximadamente el 50% de la carga de fractura. A continuación, aplicar la carga de forma continua a una velocidad que aumente de forma lineal el esfuerzo de la fibra entre 860 kPa y 1210 kPa (125 psi y 175 psi) por minuto hasta que tenga lugar la fractura.

Análisis y resultados

- Tome tres medidas a lo largo de cada dimensión (una en cada extremo y otra en el centro) redondeando a un múltiplo de 1,3 mm (0,05 pulg.), para determinar la anchura media, la profundidad media y la línea de fractura de las probetas en la sección de fractura.
- Si la fractura comienza en la parte de la superficie comprendida dentro del tercio central de la longitud del vano, calcule el módulo de fractura como sigue:

$$R = \frac{Mc}{I} = \frac{PL}{bd^2}$$

donde

R = módulo de fractura, MPa (psi)

M = momento de flexión máximo, N·mm (libras·pulg.)

$c = \frac{d}{2'}$ mm (pulg.)

I = momento de inercia

$= \frac{bh^3}{12}$, mm^4(pulg.^{4})

P = carga máxima, N (lb)
L = longitud del vano, mm (pulg.)
b = anchura media, mm (pulg.)
d = profundidad media, mm (pulg.)

- Si la fractura se produce en la parte de la superficie situada fuera del tercio central de la longitud del vano, pero a una distancia no superior a un 5% de la longitud del vano, calcule el módulo de fractura como sigue:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

donde

a = distancia media entre la línea de fractura y el soporte más próximo de la probeta en milímetros (pulgadas).

- Si la fractura se produce en la parte de la superficie situada fuera del tercio central de la longitud del vano y a una distancia superior al 5% de la longitud del vano, deberá descartar los resultados de la prueba.

Informe

- Número de identificación de la probeta.
- Anchura media.
- Profundidad media.
- Longitud del vano.
- Carga máxima aplicada.
- Módulo de ruptura o fractura aproximado a un múltiplo de 0,03 MPa (5 psi).
- Historial de curado y condición de humedad aparente en el momento de llevar a cabo la prueba.
- Si las pruebas se han refrentado o se han utilizado tiras de cuero.
- Defectos de las probetas.
- Edad de las probetas.

Experimento 18

Número esclerométrico del hormigón endurecido

Designación ASTM

ASTM C805: *Rebound Number of Hardened Concrete* (Número esclerométrico del hormigón endurecido).

Propósito

Determinar el número esclerométrico del hormigón de cemento portland endurecido.

Significado y uso

El número esclerométrico se utiliza para valorar la uniformidad y la resistencia del hormigón. También se puede emplear para determinar cuándo es posible eliminar los encofrados y apuntalamientos.

Aparato

Esclerómetro (Figuras 7.34 y A.42)



FIGURA A.42 Comprobación de una losa de hormigón con un esclerómetro.

Procedimiento de prueba

1. Pulir y limpiar la superficie de hormigón frotando con la piedra abrasiva incorporada al esclerómetro.
2. Sujetar firmemente el instrumento en una posición que permita al émbolo golpear perpendicularmente a la superficie de prueba.
3. Aumentar gradualmente la presión sobre el émbolo hasta que el martillo impacte.
4. Después del impacto, anotar el número esclerométrico con dos dígitos significativos.
5. Realizar 10 lecturas en cada una de las áreas de prueba.

Condiciones de prueba

1. La distancia mínima entre dos pruebas de impacto debe ser de 25 mm (1 pulg.).
2. Descartar la lectura si el impacto penetra a través de un hueco de aire próximo a la superficie.
3. Descartar las lecturas que difieran de la media de las 10 lecturas más de siete unidades y determinar la media de las lecturas restantes.
4. Si más de dos lecturas difieren de la media en siete unidades o más, descartar todas las lecturas.
5. El esclerómetro debe revisarse y verificarse periódicamente utilizando yunques de metal, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Informe

- Identificación, localización y condiciones de curado de la estructura.
- Numero esclerométrico promedio.
- Posición del martillo durante la prueba, como por ejemplo, hacia arriba, hacia abajo o formando un ángulo específico.
- Resistencia a la compresión estimada utilizando las correlaciones disponibles, como por ejemplo las proporcionadas por el fabricante. No obstante, debe tenerse en cuenta que la prueba del esclerómetro no pretende ser una alternativa para determinar la resistencia del hormigón.

Experimento 19

Resistencia a la penetración del hormigón endurecido

Designación ASTM

ASTM C803: *Penetration Resistance of Hardened Cocrete* (Resistencia a la penetración del hormigón endurecido).

Propósito

Valorar la uniformidad del hormigón de cemento portland endurecido e indicar su resistencia ya colocado.

Significado y uso

La resistencia a la penetración se puede utilizar para evaluar la uniformidad y la resistencia del hormigón.

Aparatos

El aparato para medir la resistencia a la penetración (sonda de Windsor) (Figura 7.35) consta de:

- Unidad de accionamiento.
- Sonda de aleación de acero endurecido.
- Instrumento de medida.
- Dispositivo de posicionamiento.

Procedimiento de prueba

1. Colocar el dispositivo de posicionamiento sobre la superficie de hormigón en el lugar que se desee probar. Hay disponibles dos dispositivos de posicionamiento: un dispositivo simple y otro triangular.
2. Montar una sonda en la unidad de accionamiento.
3. Colocar la unidad de accionamiento y la sonda en el dispositivo de posicionamiento.
4. Disparar y clavar la sonda en el hormigón. En el caso de emplear el dispositivo triangular, repetir el proceso para cada posición (Figuras A.43 y A.44).
5. En el caso de emplear un dispositivo de posicionamiento simple, coloque la placa base de medida sobre la sonda y determine con el instrumento de medida la longitud de la sonda que no haya penetrado en el hormigón. En el caso de usar el dispositivo triangular, coloque la placa triangular sobre las tres sondas, coloque el instrumento de medida en el agujero disponible en el centro de la placa triangular y lea el valor medio de la longitud no cubierta por el hormigón. Alternativamente,



FIGURA A.43 Disparo e introducción de una sonda de Windsor en el hormigón utilizando un dispositivo de posicionamiento triangular.



FIGURA A.44 Tres sondas clavadas en el hormigón.

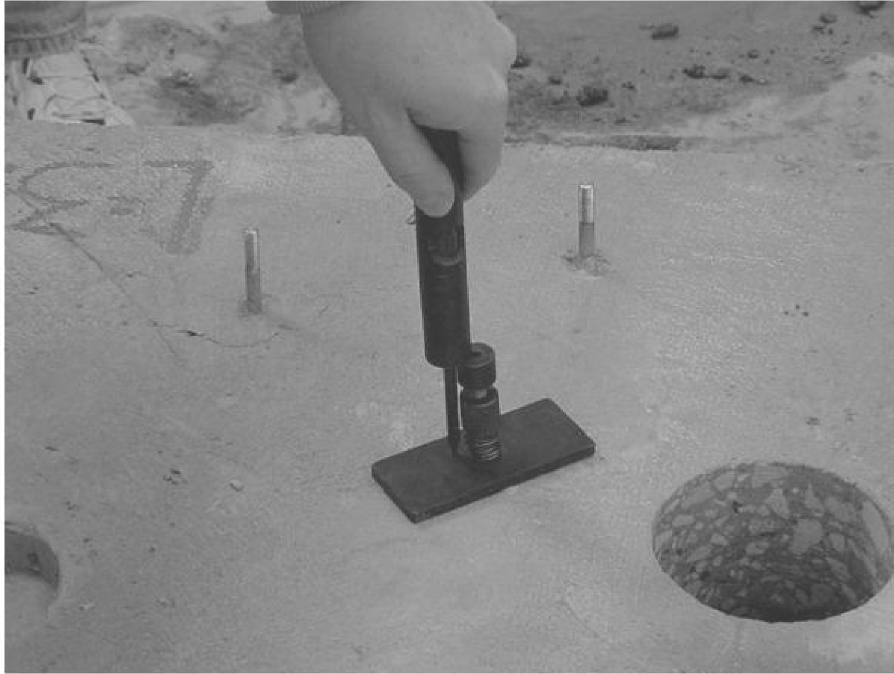


FIGURA A.45 Medida de la penetración de una sonda.

pueden medirse las longitudes de las tres sondas que sobresalen del hormigón y calcular la media de los tres valores así obtenidos (Figura A.45)

Informe

- Identificación, localización condición de curado de la estructura.
- Longitud expuesta media de la sonda.
- Resistencia a la compresión estimada, utilizando las correlaciones disponibles, tales como las proporcionadas por el fabricante. No obstante, debe tenerse en cuenta que la prueba de resistencia a la penetración no pretende ser una alternativa para determinar la resistencia del hormigón.

Experimento 20

Ensayos con elementos de mampostería de hormigón

Designación ASTM

ASTM C140: *Samplig and Testing Concrete Masonry Units and Related Units* (Muestreo y prueba de elementos de mampostería de hormigón y elementos relacionados).

Propósito

Probar elementos de mampostería de hormigón con el fin de determinar la resistencia a la compresión, la absorción, el grado de humedad y la densidad.

Significado y uso

El ensayo proporciona los datos de resistencia a la compresión, absorción, grado de humedad y densidad que permiten controlar y especificar elementos de mampostería de hormigón. Estos datos son importantes para la seguridad y correcto comportamiento de las estructuras de mampostería.

Aparatos

- Máquina de pruebas.
- Placas y bloques de soporte de acero.
- Balanza.

Procedimiento de prueba para determinar la resistencia a la compresión

1. Se precisan elementos representativos para llevar a cabo el ensayo dentro de las 72 horas siguientes de recibir dichos elementos en el laboratorio. Durante este tiempo deberán almacenarse al aire a una temperatura de 24 ± 8°C (75 ± 15°F) y una humedad relativa inferior al 80%.
2. El ensayo se realiza, bien sobre el elemento completo, o bien sobre una parte de un elemento cortado con sierra. Si la capacidad o el tamaño de la máquina de prueba no permite probar un elemento completo, se utilizará una parte del mismo.
3. Medir la longitud, anchura y altura de la probeta.
4. Tapar las superficies de soporte del elemento, utilizando azufre, materiales granulares o enlucido de yeso.
5. Colocar la probeta de ensayo con su centro de gravedad alineado verticalmente con el centro del émbolo del bloque de soporte de acero con asentamiento esférico de la máquina de pruebas (Figura A.46).
6. Aplicar la carga hasta la mitad de la carga máxima esperada a la velocidad que se prefiera y, a continuación, aplicar la carga a una velocidad uniforme del cabezal

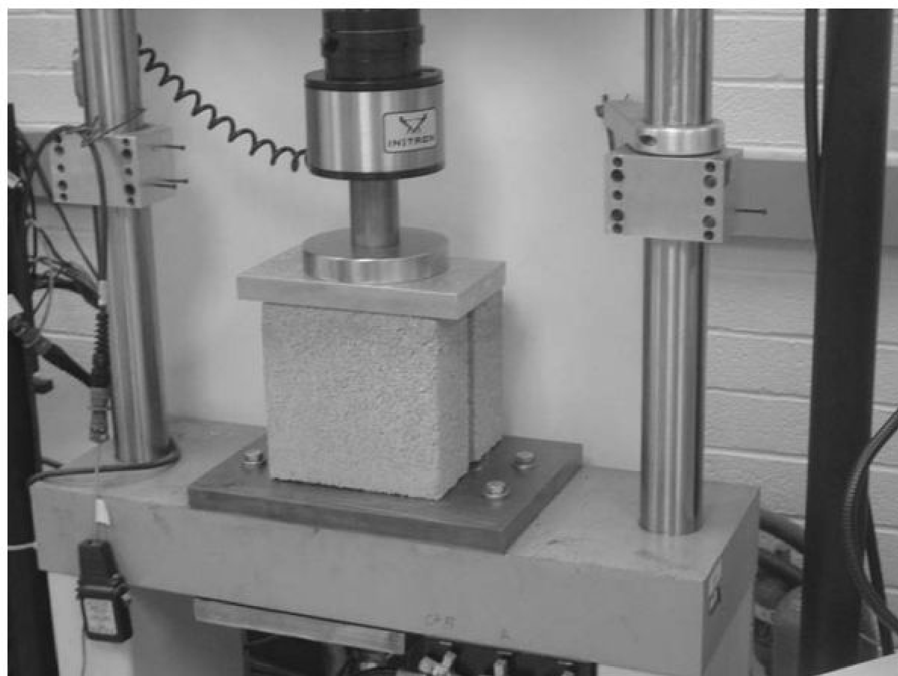


FIGURA A.46 Prueba de compresión de un elemento de mampostería de hormigón.

móvil, de modo que la prueba tarde en completarse entre uno y dos minutos.
7. Anotar la carga máxima de compresión en newtons (libras) como P_{max}.

Procedimiento de prueba para determinar la absorción

1. Para realizar la prueba de absorción se precisan tres elementos representativos completos.
2. Pesar la probeta inmediatamente después del muestreo y anotar dicho peso como el peso en recepción (W_r).
3. Sumergir la probeta en agua a una temperatura de entre 15°C y 26°C (60°F y 80°F) durante 24 horas.
4. Pesar la probeta teniéndola suspendida de un alambre de metal y completamente sumergida en el agua. Anotar este peso como el peso en inmersión (W_i).
5. Sacar la probeta del agua y dejarla escurrir durante un minuto, colocándola sobre una malla de alambre grueso de 9,5 mm (3/8 pulg.) y eliminando el agua visible de la superficie con un paño. Pesar la probeta y anotar este peso como peso saturado (W_s).
6. Secar la probeta en un horno ventilado a una temperatura de entre 100°C y 115°C (212°F y 239°F) durante no menos de 24 horas y hasta que dos pesadas sucesivas a intervalos de dos horas presenten una diferencia no mayor del 0,2%. Anote este peso con el peso de la probeta secada en horno (W_d).

Análisis y resultados

Resistencia a la compresión del área total, MPa (psi) = P_{max}/A_g

donde

P_{max} = carga máxima de compresión, N (libras)
A_g = área total, mm^2 (pulg.^{2}) = $L \times W$
L = longitud media, mm (pulgadas)
W = anchura media, mm (pulgadas)

Resistencia a la compresión del área neta, MPa (psi) = P_{max}/A_n

donde

A_n = área media neta, mm^2 = V_n/H
A_n = área media neta, pulg.^{2} = $(V_n \times 1728)/H$
V_n = volumen neto, mm^3 = $(W_s - W_i) \times 10^6$
V_n = volumen neto, pies^3 = $(W_s - W_i)/62{,}4$
H = altura media, mm (pulgadas)
W_s = peso del elemento saturado, kg (libras)
W_i = peso del elemento sumergido, kg (libras)

Absorción, kg/m^3 = $[(W_s - W_d)/(W_s - W_i)] \times 1000$
Absorción, libra/pie^3 = $[(W_s - W_d)/(W_s - W_i)] \times 62{,}4$
Absorción, % = $[(W_s - W_d)/W_d] \times 100$
Grado de humedad, % de la absorción total = $[(W_r - W_d)/(W_s - W_d)] \times 100$
Densidad, kg/m^3 = $[W_d/(W_s - W_i)] \times 1000$
Densidad, libra/pie^3 = $[W_d/(W_s - W_i)] \times 62{,}4$

donde

W_d = peso de la probeta secada en horno, kg (libras)
W_r = peso en recepción, kg (libras)

Informe

- Resistencias a la compresión del área total y el área neta aproximadas a un múltiplo de 70 kPa (10 psi) para cada probeta y los valores medios correspondientes a las tres probetas.
- Absorción, grado de humedad como porcentaje de la absorción total y densidad.

Experimento 21

Viscosidad del aglomerante asfáltico

Designación ASTM

ASTM D4402: *Viscosity Determinations of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer* (Determinación de la viscosidad del asfalto a temperaturas altas utilizando un viscosímetro rotacional).

Propósito

Determinar la viscosidad aparente del aglomerante asfáltico para temperaturas comprendidas entre 38°C y 260°C (100°F y 500°F), utilizando un viscosímetro rotacional y una cámara térmica de temperatura controlada para mantener la temperatura durante la realización del ensayo.

Significado y uso

Es necesario conocer el valor de la viscosidad para garantizar una correcta manipulación del aglomerante asfáltico, así como para el control de calidad y el aseguramiento de la calidad. También se utiliza para determinar las temperaturas de mezcla y compactación del hormigón asfáltico. Esta prueba se emplea en las mezclas Superpave y en la caracterización PG de los aglomerantes asfálticos.

Aparatos

- Viscosímetro rotacional (Figura 9.15).
- Agujas.
- Sistema Thermosel, que consta de un contenedor térmico y una cámara de muestras, un controlador SCR y una sonda, y un equipo para dibujo de gráficas.

Procedimiento de prueba

1. Encender el equipo Thermosel y ajustar el controlador de temperatura proporcional a la temperatura de prueba deseada.
2. Esperar una hora y media (o hasta que se alcance la temperatura de equilibrio) con la aguja en la cámara (comprobar la lámpara de control).
3. Extraer el contenedor de muestras y añadir el volumen de muestra especificado para la aguja, aproximadamente entre 8 mL y 10 mL. Tomar las precauciones necesarias para evitar que la muestra se sobrecaliente y que se prendan muestras con un bajo punto de inflamabilidad. No debe llenarse en exceso el contenedor de la muestra. El volumen de la muestra es crítico para cumplir el estándar de calibración del sistema.
4. Agitar el contenedor lleno de asfalto para obtener una muestra representativa.

5. El nivel de líquido debe intersectar con el eje de la aguja en un punto situado aproximadamente a 3 mm (1/8 de pulgada) por encima de la interfaz entre el cuerpo cónico superior y el eje de la aguja.
6. Con una herramienta de extracción, vuelva a colocar la cámara cargada dentro del contenedor térmico.
7. Haga descender el viscosímetro y alinee el contenedor térmico.
8. Insertar la aguja seleccionada en el líquido de la cámara y acoplarla al viscosímetro (Figura A.47). Para los aglomerantes asfálticos se utiliza la aguja número 27 o la aguja número 20.
9. Dejar que el asfalto alcance la temperatura de equilibrio (aproximadamente 15 minutos).
10. Poner en funcionamiento el viscosímetro a una velocidad de 20 rpm.
11. Anotar tres lecturas con una diferencia de 60 segundos para cada temperatura de prueba.
12. Multiplicar el factor de viscosidad por las lecturas obtenidas con el viscosímetro rotacional para obtener la viscosidad en centipoises.

Informe

- Viscosidad para cada temperatura de prueba.
- Número de aguja y velocidad de rotación.



FIGURA A.47 Inserción de la aguja en la cámara antes de realizar la prueba con el viscosímetro rotacional.

Experimento 22

Ensayo con reómetro de cortante dinámica para aglomerantes asfálticos

Designación ASTM

ASTM P246: *Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder for Specification Purposes Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)* [Determinación de las propiedades reológicas de aglomerantes asfálticos con propósitos de especificación utilizando un reómetro de cortante dinámica].

Propósito

Determinar el módulo de cortante complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) de los aglomerantes asfálticos utilizando un reómetro de cortante dinámica.

Significado y uso

El módulo de cortante complejo es un indicador de la resistencia a la deformación del aglomerante asfáltico cuando se le somete a una carga. El módulo y el ángulo de fase de la cortante compleja definen la resistencia a la deformación cortante del aglomerante asfáltico en la región viscoelástica. Esta prueba se utiliza para la clasificación Superpave de los aglomerantes asfálticos.

Aparatos

- Reómetro de cortante dinámica (DSR) (Figura A.48).
- Placas de prueba.
- Controlador de temperatura.
- Dispositivo de carga.
- Sistema de control y adquisición de datos.
- Diversos elementos, como moldes de probeta, recortador de probetas, cámara ambiental, detector térmico de referencia y detector de temperatura calibrado.

Procedimiento de prueba

1. Calentar el aglomerante asfáltico hasta que sea lo suficiente fluido como para verterlo en las probetas.
2. Limpiar y secar cuidadosamente las superficies de la placas de prueba, de modo que la probeta se adhiera uniformemente a ambas placas. Poner la cámara a una temperatura de aproximadamente 45°C, con el fin de que las placas estén precalentadas antes de montar la probeta.
3. Colocar la muestra de aglomerante asfáltico en el reómetro de cortante dinámica, utilizando uno de los métodos siguientes:

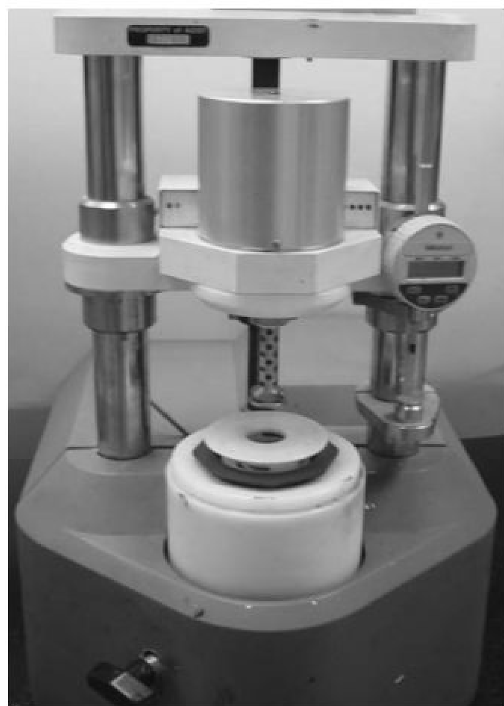


FIGURA A.48 Reómetro de cortante dinámica.

- Quitar la placa extraible y, a la vez que se mantiene el contenedor de muestras unos 15 mm por encima de la superficie de la placa de prueba, verter el aglomerante asfáltico en el centro de la placa de prueba superior continuamente hasta que quede cubierta toda la placa, excepto un perímetro de aproximadamente 2 mm de ancho. Esperar varios minutos hasta que la probeta se espese y luego montar la placa en el reómetro para realizar el ensayo.
- Verter el asfalto caliente en un molde de goma de silicona que formará una probeta con un diámetro aproximadamente igual al diámetro de la placa de prueba superior y una altura igual a unas 1,5 veces el espaciado de prueba. Dejar enfriar la goma de silicona hasta la temperatura ambiente. Extraer la probeta del molde y centrarla sobre la placa inferior del reómetro de cortante dinámica.

4. Aproximar entre sí las placas de prueba para presionar la masa de asfalto entre las mismas. Mover las placas hasta que el espacio entre ellas sea igual al espaciado de prueba más 0,05 mm. Recortar la probeta pasando una herramienta caliente de recorte por los perímetros de las placas superior e inferior para recortar el asfalto sobrante.
5. Después de terminar con el trabajo de recorte, disminuya el espacio en 0,05 mm. Ahora el espesor de la muestra deberá ser igual al espaciado de prueba deseado.

6. Calentar la probeta hasta la temperatura de prueba más ±0,1°C (Figura A.49). Comience el ensayo después de que la temperatura deseada ±0,1°C se haya mantenido durante al menos 10 minutos. La temperatura de prueba puede seleccionarse en las especificaciones dadas en la Tabla 9.3.
7. Una vez alcanzada la temperatura, acondicione la probeta aplicando la deformación de cortante requerida durante 10 ciclos a una velocidad radial de 10 radianes/s. Los valores de la deformación cortante varían entre el 1% y el 12%, dependiendo de la rigidez del aglomerante que se esté probando. Para aglomerantes relativamente blandos a altas temperaturas se utilizan valores de deformación altos, mientras que para los aglomerantes duros se emplean valores de deformación bajos. El reómetro mide el par requerido para conseguir la deformación cortante establecida y lo mantiene como el par máximo durante el ensayo.
8. El sistema de adquisición de datos calcula automáticamente G^* y δ a partir de los datos del ensayo adquiridos siempre y cuando se haya activado correctamente.

Informe

- Identificación y descripción del material probado.
- Temperatura de prueba y dimensiones de la muestra incluyendo el espesor.
- Nivel de esfuerzo.
- Los valores de G^* y δ.



FIGURA A.49 Baño de agua para controlar la temperatura de la probeta durante el ensayo.

Experimento 23

Prueba de penetración del cemento asfáltico

Designación ASTM

ASTM D5: *Penetration of Bituminous Materials* (Penetración de materiales bituminosos).

Propósito

Determinar la penetración de materiales bituminosos semisólidos y sólidos.

Significado y uso

La prueba de penetración se utiliza como una medida de la consistencia. Valores altos de penetración indican una consistencia blanda.

Aparatos

- Aparato de penetración y aguja (Figuras 9.19 y A.50).
- Contenedor de muestras, baño de agua, disco de transferencia, dispositivo temporizador para penetrómetro operado manualmente y termómetros.

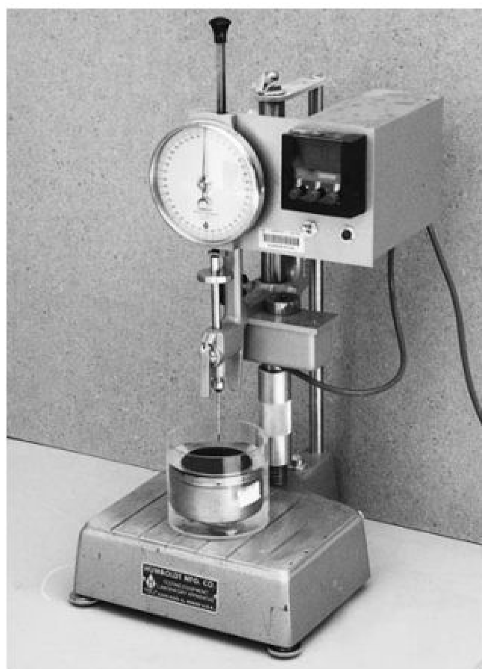


FIGURA A.50 Aparato para efectuar la prueba de penetración de aglomerantes asfálticos.

Procedimiento de prueba

1. Calentar el aglomerante asfáltico hasta que sea lo suficiente fluido como para verterlo.
2. Verter la muestra en el contenedor de muestras y dejarla enfriar al menos durante una hora.
3. Colocar la muestra junto con el disco de transferencia en el baño de agua a una temperatura de 25°C (77°F) durante una o dos horas.
4. Limpiar y secar la aguja con un paño limpio e insertarla en el penetrómetro. A menos que se especifique otra cosa, coloque la masa de 50 g por encima de la aguja, para obtener una carga móvil total de 100 g.
5. Colocar el contenedor de muestras en el disco de transferencia, cubrir el contenedor totalmente con agua tomada del baño a temperatura constante y colocar el disco de transferencia sobre la plataforma del penetrómetro.
6. Colocar la aguja haciéndola descender lentamente hasta que su punta haga contacto con la superficie de la muestra. Esto se consigue haciendo que la punta de la aguja haga contacto con su imagen reflejada en la superficie de la muestra, teniendo adecuadamente colocada una fuente de luz.
7. Sacar rápidamente el contenedor de la aguja el periodo de tiempo especificado (cinco segundos) y ajustar el instrumento para medir la distancia penetrada en décimas de milímetro.
8. Tomar al menos tres medidas en puntos de la superficie de la muestra que no estén a menos de 10 mm alejados del lateral del contenedor y espaciadas entre sí no menos de 10 mm.

Informe

- El valor medio de los tres valores de penetración redondeando al entero más próximo.

Experimento 24

Viscosidad absoluta del asfalto

Designación ASTM

ASTM D2171: *Viscosity of Asphalts en su sitio Vacuum Capillary Viscometer* (Determinación de la viscosidad de los asfaltos con un viscosímetro capilar de vacío).

Propósito

Determinar la viscosidad absoluta del asfalto utilizando un viscosímetro capilar de vacío a 60°C (140°F).

Significado y uso

La viscosidad a 60°C (140°F) caracteriza el comportamiento del flujo y puede utilizarse para las especificaciones de cementos asfálticos y fluidificados.

Aparatos

- Viscosímetros, como por ejemplo el viscosímetro de vacío de Cannon–Manning (Figura 9.20) o viscosímetro de vacío modificado de Koppers.
- Baño con los accesorios necesarios para visualizar el viscosímetro y el termómetro.
- Termómetros, sistema de vacío y dispositivo temporizador.

Procedimiento de prueba

1. Mantener el baño a una temperatura de 60°C (140°F).
2. Seleccionar un viscosímetro limpio y seco que proporcione un tiempo de flujo mayor de 60 segundos y precalentarlo a 135°C (275°F).
3. Cargar el viscosímetro vertiendo la muestra de asfalto preparada hasta la línea que marca el nivel de llenado.
4. Colocar el viscosímetro cargado en un horno o en un baño cuya temperatura se mantenga a 135°C durante 10 minutos, para permitir que las burbujas de aire escapen.
5. Sacar el viscosímetro del horno o del baño y pasados cinco minutos, meterlo en un contenedor y colocarlo verticalmente en el baño, de modo que la marca de temporización superior esté al menos 20 mm por debajo de la superficie del líquido del baño.
6. Hacer un vacío de 300 mm Hg en el sistema de vacío y conectar este al viscosímetro.
7. Una vez que el viscosímetro haya estado en el baño durante 30 minutos, hacer que el asfalto comience a fluir en el mismo abriendo la válvula de retención ubicada en el conducto que lleva al sistema de vacío.

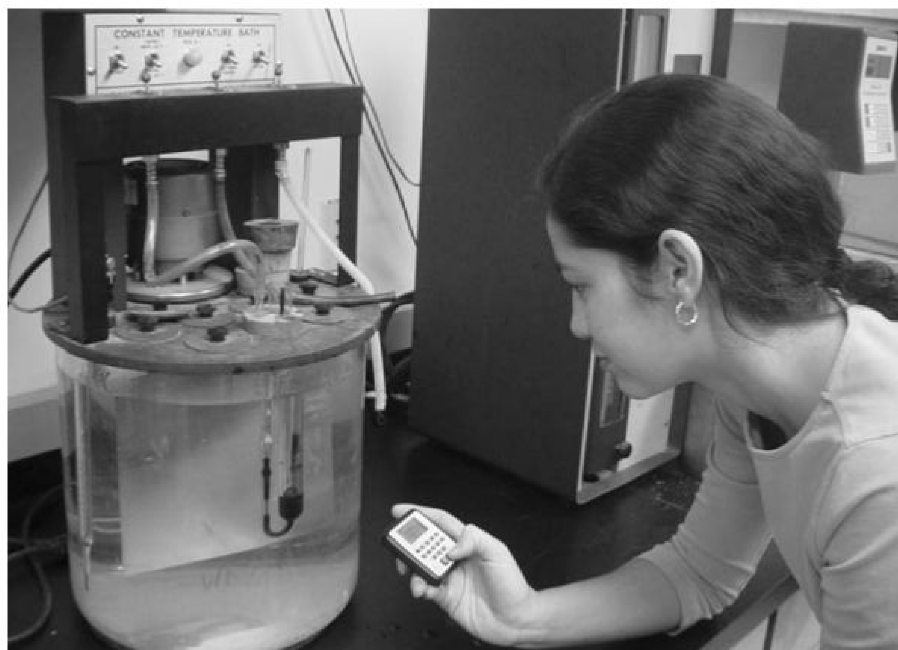


FIGURA A.51 Medida del tiempo de flujo utilizando un cronómetro.

8. Medir con una precisión de 0,1 segundo el tiempo requerido para que el extremo anterior del menisco pase entre sucesivos pares de marcas de temporización. Anotar el primer tiempo de flujo entre dos marcas de temporización que sea superior a 60 segundos e identificar la pareja de marcas de temporización (Figura A.51).

Análisis y resultados

- Seleccione el factor de calibración que corresponda al par de marcas temporales. Calcule viscosidad con tres cifras significativas aplicando la fórmula siguiente:

$$P = Kt$$

donde

P = viscosidad absoluta, Poises
K = factor de calibración seleccionado, Poises/s
t = tiempo de flujo, s

Informe

- Viscosidad absoluta.
- Temperatura de prueba y vacío.

Experimento 25

Preparación y determinación de la densidad de probetas de asfalto mezclado en caliente mediante el compactador giratorio Superpave

AASHTO Designación

AASHTO T 312-03: *Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of el Superpave Gyratory Compactor* (Preparación y determinación de la densidad de probetas de asfalto mezclado en caliente mediante el compactador giratorio Superpave).

Propósito

Preparar probetas de hormigón asfáltico con determinadas densidades para condiciones de carga y climatológicas de un pavimento real, o para utilizarlas en el laboratorio cuando sea necesario.

Significado y uso

El compactador giratorio Superpave es capaz de acomodar una gran cantidad de áridos. Además, este dispositivo proporciona una medida de la capacidad de compactación que permite identificar potenciales vulnerabilidades del comportamiento de la mezcla y problemas de compactación similares. Este método de compactación se utiliza para el diseño de mezclas Superpave por el método volumétrico de hormigón asfáltico y para realizar el control de calidad a pie de obra durante la construcción de pavimentos con HMA.

Aparatos

- Bastidor de reacción, base giratoria y motor (Figura 9.24).
- Sistema de carga, vástago de carga y galga de presión.
- Sistema de medida y registro de alturas.
- Molde y placa base.

Procedimiento

1. Las probetas deben mezclarse y compactarse bajo condiciones de temperatura equiviscosas de 0,170 ± 0,02 Pa · s y 0,280 ± 0,03 Pa · s, respectivamente. Esta mezcla se realiza con una mezcladora mecánica.
2. Después de hacer la mezcla, las probetas se someten a un proceso de envejecimiento a corto plazo durante dos horas en un horno de tiro forzado a la temperatura de compactación, la cual se corresponde con una viscosidad del aglomerante de



FIGURA A.52 Colocación del asfalto mezclado en caliente en el molde.

0,28 ± 00,3 Pa·s. Durante este tiempo, las probetas de mezcla poco densa deben distribuirse hasta obtener un espesor que se traduzca en 21 kg a 22 kg por metro cúbico. Pasada una hora las muestras se agitan para garantizar un envejecimiento uniforme.

3. Colocar los moldes de compactación y las placas base en un horno a la temperatura de compactación durante al menos entre 30 y 45 minutos, antes de utilizarlos.
4. Si las probetas solo se van a emplear para cálculos volumétricos, utilice la suficiente cantidad de mezcla para obtener una probeta de 150 mm de diámetro y aproximadamente 115 mm de altura. Esto requiere unos 4500 g de áridos. Si es necesario, también se pueden preparar probetas con otras alturas para llevar a cabo más pruebas de comportamiento (Figura A.52).
5. Encender el compactador y ajustar la presión vertical a 600 kPa.
6. Poner el contador de giros a cero y fijar que se detenga cuando se haya alcanzado el número deseado de giros. Son importantes tres datos acerca de los giros: el número de giros de diseño (N_d), el número inicial de giros (N_i) y el número máximo de giros (N_m). El número de giros de diseño es una función del clima en el que la mezcla vaya a colocarse y del nivel de tráfico que tendrá que soportar.
7. Una vez colocada la placa base, coloque un disco de papel en la parte superior de la placa y cargue en una sola operación el molde con la mezcla sometida a envejeci-



FIGURA A.53 Colocación del molde en el compactador giratorio.

miento a corto plazo. La parte superior de la probeta no compactada deberá ser ligeramente redondeada. Coloque un disco de papel encima de la mezcla. Dependiendo del modelo de compactador puede ser necesario colocar una placa sobre la mezcla.

8. Colocar el molde en el compactador y centrarlo bajo el vástago (Figura A.53). Hacer descender el vástago hasta que entre en contacto con la mezcla y la presión resistente sea de 600 kPa.
9. Aplicar un ángulo de giro de 1,25° e iniciar el proceso de compactación.
10. Una vez alcanzado el número deseado de giros, el compactador se detendrá automáticamente. Después de dejar de aplicar el ángulo y la presión, extraiga el molde que contiene la probeta compactada.
11. Anotar los resultados de la altura de la probeta en función del número de giros.
12. Después de un periodo de enfriamiento adecuado, extraer la probeta del molde y etiquetarla (Figura A.54).
13. Medir la gravedad específica en seco de las probetas de acuerdo con el procedimiento ASTM D2726.

Análisis y resultados

- Calcule la gravedad específica en seco estimada para cada giro aplicando la fórmula:

Gravedad específica en seco estimada = peso neto de la probeta $/(\pi d^2 h/4)$

donde

d = diámetro del molde (150 mm)
h = altura de la probeta correspondiente al número de giros deseado



FIGURA A.54 Probeta preparada con compactador giratorio.

- Calcule el factor de corrección C como sigue:

$$C = \frac{\text{gravedad específica en seco medida}}{\text{gravedad específica en seco estimada para } N_m}$$

- Calcule la gravedad específica en seco corregida multiplicando cada gravedad específica en seco estimada por el factor de corrección.
- Calcule el porcentaje de la gravedad específica en seco corregida respecto de la gravedad específica máxima teórica (% G_{mm}).
- Dibuje en una gráfica logarítmica el número de giros en función de % G_{mm} (curva de densificación) para cada probeta.

Informe

- Ingredientes de la mezcla, origen y cualquier otra información relevante.
- Tabla de densificación.
- Curva de densificación.

Experimento 26

Preparación de probetas de hormigón asfáltico con el compactador de Marshall

Designación ASTM

ASTM D1559: *Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus* (Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas con un aparato de Marshall).

Propósito

Preparar probetas de hormigón asfáltico utilizando el martillo de Marshall.

Significado y uso

Este método se utiliza para diseñar la mezcla utilizando el procedimiento de Marshall y para medir sus propiedades.

Aparatos

- Puede utilizarse un compactador manual o mecánico de 4,5 kg (10 libras) de peso y 0,48 m (18 pulg.) de altura de caída (Figura 9.25).
- Moldes con diámetro interior de 102 mm (4 pulg.) y una altura de 75 mm (3 pulg.), placas de base y aros.
- Pedestal de compactación, dispositivo de extracción de probetas, y otros elementos como contenedor de moldes, espátula, bandejas y horno.

Procedimiento

1. Determinar las temperaturas de mezcla y de compactación, de manera que las viscosidades cinemáticas del aglomerante sean 170 ± 20 cSt y 280 ± 30 cSt, respectivamente.
2. Separar todos los tamaños de árido requeridos y secar en horno.
3. Pesar lotes de 1200 g, de manera que la granulometría satisfaga el punto medio de la banda de especificación. Se puede seguir una especificación establecida o la especificación ASTM D3515.
4. Colocar el aglomerante asfáltico y el árido en el horno hasta que alcancen la temperatura de mezcla (aproximadamente 150°C, o 300°F).
5. Añadir la cantidad especificada de asfalto al árido.
6. Utilizando una mezcladora mecánica, o manualmente, mezclar los áridos y el asfalto (Figura A.55). Algunos organismos requieren el curado de la mezcla tal y como se especifica en el procedimiento AASHTO R30.
7. Colocar un papel en el interior del molde. A continuación, colocar el lote completo de hormigón asfáltico en el molde calentado a la temperatura de compactación y



FIGURA A.55 Asfalto mezclado en caliente con una mezcladora mecánica.

consolidar con la espátula caliente la mezcla 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la zona central.

8. Colocar un aro y un papel y después el molde sobre el pedestal. Sujetar el molde con el contenedor y aplicar el número requerido de golpes utilizando un martillo manual o mecánico (Figuras A.56 y A.57). El número típico de



FIGURA A.56 Compactación de una probeta utilizando un martillo Marshall manual.



FIGURA A.57 Compactación de una probeta de asfalto mezclado en caliente con un martillo Marshall mecánico.



FIGURA A.58 Cómo quitar el disco de papel de un probeta de Marshall.

golpes que hay que dar en cada cara es de 50 ó 75, dependiendo del volumen de tráfico esperado en la carretera en la que se vaya a utilizar la mezcla. Invierta el molde y dé el mismo número de golpes sobre la otra cara.

9. Después de que se enfríe hasta la temperatura ambiente, extraiga la probeta utilizando un dispositivo de extracción. El enfriamiento se puede acelerar colocando el molde y la probeta en una bolsa de plástico y metiendo esta en agua fría. Quite el papel como se muestra en la Figura A.58.

Informe

- Ingredientes de la mezcla, origen y otras información relevante.
- Número de golpes sobre cada lado de la probeta.

Experimento 27

Gravedad específica en seco de mezclas bituminosas compactadas

Designación ASTM

ASTM D2726: *Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures* (Gravedad específica en seco de mezclas bituminosas compactadas).

Propósito

Determinar la gravedad específica en seco de probetas de mezclas asfálticas compactadas.

Significado y uso

Los resultados de este ensayo se utilizan para el análisis de huecos de las mezclas asfálticas compactadas.

Probetas

Pueden utilizarse mezclas bituminosas moldeadas en el laboratorio o testigos procedentes de pavimentos bituminosos.

Aparatos

- Balanza equipada con la suspensión y el contenedor adecuados para poder pesar la probeta estando suspendida de la balanza.
- Baño de agua.

Procedimiento de prueba

1. Pesar la probeta al aire y anotar dicho peso como A (Figura A.59).
2. Sumergir la probeta en agua a 25 ± 1°C (77 ± 2°F) estando suspendida de la balanza durante entre tres y cinco minutos, y anotar el peso en condición de inmersión como C (Figura A.60).
3. Sacar la probeta del agua, secar la superficie con una toalla húmeda (Figura A.61), determinar el peso con superficie seca y anotarlo como B.

Análisis y resultados

- Calcule la gravedad específica en seco como

$$\text{Gravedad específica en seco} = \frac{A}{(B - C)}$$

donde



FIGURA A.59 Pesado de la probeta de asfalto mezclado en caliente al aire.



FIGURA A.60 Pesado de la probeta de asfalto mezclado en caliente sumergida en agua.

A = peso en el aire de la probeta, g
B = peso de la probeta con superficie seca, g
C = peso de la probeta en el agua, g

Informe

- Valor de la gravedad específica con tres cifras significativas.



FIGURA A.61 Eliminación del agua de la superficie de la probeta de asfalto mezclado en caliente con una toalla húmeda.

Experimento 28

Flujo y estabilidad de Marshall del hormigón asfáltico

Designación ASTM

ASTM D1559: *Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus* (Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato de Marshall).

Propósito

Determinar los valores del flujo y de la estabilidad de Marshall para el hormigón asfáltico.

Significado y uso

Este método de prueba se utiliza en el diseño de mezclas bituminosas en el laboratorio de acuerdo con el procedimiento de Marshall. Los resultados de la prueba también pueden utilizarse para caracterizar las mezclas asfálticas.

Aparatos

- Máquina de pruebas para generar un movimiento uniforme vertical con una velocidad de 50,8 mm/minuto (2 pulg./minuto), como se muestra en la Figura 9.32.
- Cabezales de prueba con un radio interno de curvatura de 50,8 mm (2 pulg.).
- Celda de carga o dinamómetro de anillo, registrador de papel continuo o medidor de flujo, baño de agua y guantes de goma.

Procedimiento de prueba

1. Poner la probeta preparada en el Experimento 25 a una temperatura de 60°C (140°F) sumergiéndola en un baño de agua entre 30 y 40 minutos, o metiéndola en un horno durante dos horas.
2. Extraer la probeta del baño de agua y a continuación secarla "ligeramente" y colocarla en el segmento inferior del cabezal de prueba. Colocar el segmento superior del cabezal de prueba sobre la probeta y colocar el conjunto completo en la máquina de pruebas.
3. Preparar el registrador de papel continuo o colocar el medidor de flujo (cuando se use) sobre una de las barras guía y ajustarlo a cero mientras se sujeta firmemente la camisa contra el segmento superior del cabezal.
4. Aplicar la carga a la probeta a una velocidad constante de 50,8 mm/min (2 pulg./min) hasta alcanzar la carga máxima y a continuación disminuir la carga (Figura A.62). El tiempo transcurrido para llevar a cabo el ensayo desde el momen-

to en que se extrae la probeta del baño de agua (o del horno) hasta la determinación de la carga máxima no debe exceder de 30 segundos.

5. Utilizando el registrador de papel continuo, anote la estabilidad de Marshall (carga máxima) y el flujo de Marshall (deformación cuando la carga máxima comienza a decrecer en unidades de 0,25 mm o centésimas de pulgada). En algunas máquinas, los valores de la carga máxima y el flujo pueden leerse en un dinamómetro de anillo y en el medidor de flujo, respectivamente.
6. Si la altura de la probeta es distinta de 63,5 mm (2,5 pulg.), multiplique el valor de la estabilidad por un factor de corrección (Tabla 9.11) (ASTM D1559).

Informe

- Identificación y tipo de probeta (preparada en el laboratorio o testigo tomado en un pavimento).
- Estabilidad media de Marshall de al menos tres probetas iguales, corregida según sea necesario, kN (lb).
- Flujo medio de Marshall de al menos tres probetas iguales.

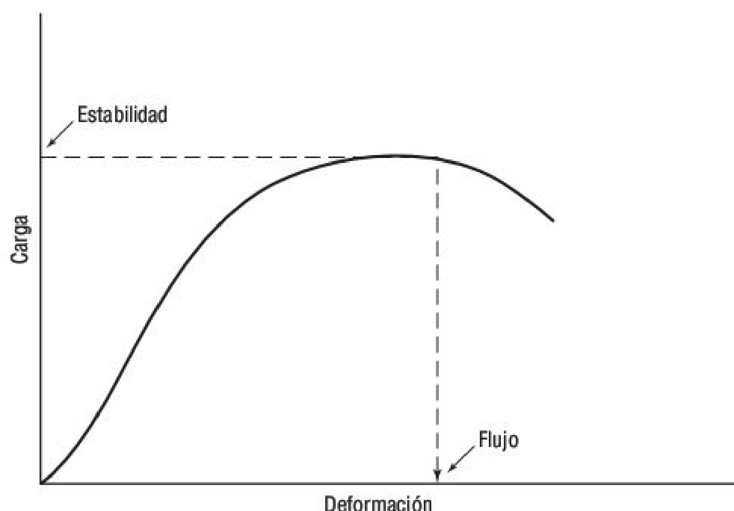


FIGURA A.62 Diagrama típico de la carga en función de la deformación durante la prueba de la estabilidad de Marshall mostrando la estabilidad y el flujo.

Experimento 29

Pruebas de flexión y compresión para la madera

Designación ASTM

ASTM D143: *Standard Methods of Testing Wood* (Métodos estándar para la realización de ensayos con madera).

Propósito

Determinar el módulo de fractura y la resistencia a la compresión de la madera realizando ensayos con probetas limpias.

Significado y uso

Estas pruebas proporcionan datos para comparar las propiedades mecánicas de varias especies y datos para el establecimiento de las funciones de resistencia. Los ensayos también proporcionan datos para determinar la influencia de factores como la densidad, el lugar de crecimiento, la variación de las propiedades con las estaciones o los tratamientos con sustancias químicas y las variaciones desde la albura al núcleo sobre las propiedades mecánicas.

Ensayo de flexión estática

Para el método primario se utilizan probetas de 50 mm × 50 mm × 760 mm (2 pulg. × 2 pulg. × 30 pulg.), y de 25 mm × 25 mm × 410 mm (1 pulg. × 1 pulg. × 16 pulg.) para el método secundario. Para los soportes y el vano de carga, emplear un sistema de carga central y una longitud de vano de 710 mm (28 pulg.) para el método primario y de 360 mm (14 pulg.) para el método secundario.

Aparatos

- Máquina de pruebas de deformación controlada.
- Bloques de soporte para aplicar la carga.

Procedimiento

1. Colocar la probeta de manera que la carga se aplique en el centro del vano. La carga se aplica a través del bloque de soporte a la superficie tangencial en las proximidades de la médula (Figura A.63).
2. Aplicar la carga de forma continua a lo largo del ensayo con una velocidad de 2,5 mm/min (0,10 pulg./min) para las probetas del método primario y una velocidad de 1,3 mm/min (0,05 pulg./min) para las probetas del método secundario.
3. Registrar la curva de carga–deflexión por encima y por debajo de la carga máxima. Continuar registrando datos hasta una deflexión de 150 mm (6 pulg.) o hasta que la

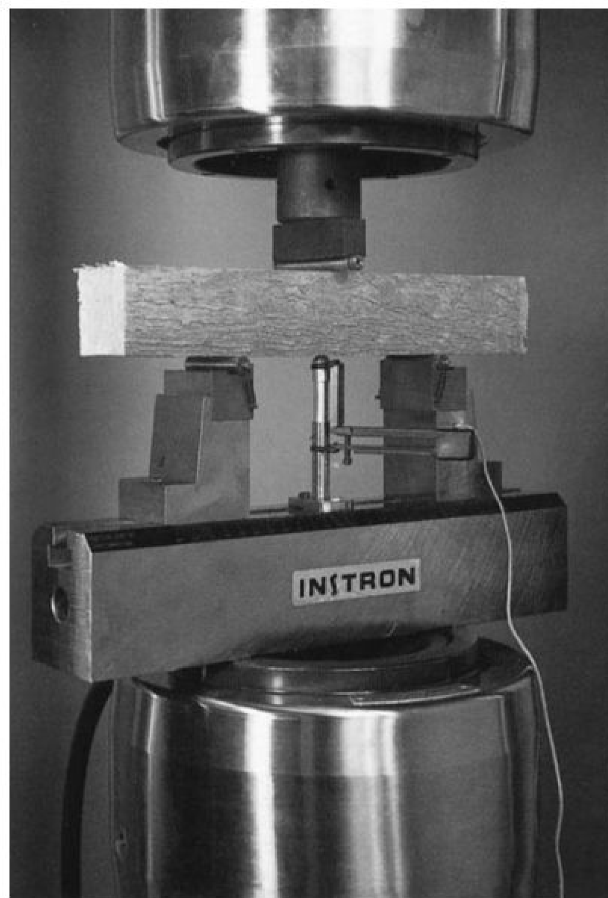


FIGURA A.63 Probeta de madera sometida a un ensayo de flexión estática.

probeta sometida a una carga de 890 N (200 libras) se fracture para las probetas del método primario y hasta una deflexión de 76 mm (3 pulg.) o hasta que la probeta sometida a una carga de 220 N (50 libras) se fracture para las probetas del método secundario.

4. Dentro del límite de proporcionalidad, tomar lecturas de la deflexión redondeándolas a múltiplos de 0,02 mm (0,001 pulg.). Una vez alcanzado el límite de proporcionalidad, la deflexión puede medirse con una galga hasta que llegue al límite de su capacidad, normalmente 25 mm (1 pulg.). Cuando se producen deflexiones por encima de 25 mm (1 pulg.), estas pueden observarse mediante una regla montada sobre el cabezal móvil.
5. Obtener las lecturas correspondientes a la carga y la deflexión de la primera fractura, la carga máxima y los puntos de cambio súbito, y el diagrama de carga–deformación.

Análisis y resultados

- Calcule el módulo de fractura como

$$R = \frac{Mc}{I}$$

donde

R = módulo de fractura, MPa (psi)
M = momento de flexión = $PL/4$
P = carga máxima, N (lb)
L = longitud de vano, mm (pulg.)
c = distancia desde el eje neutral al borde de la muestra = $1/2\ h$
I = momento de inercia = $bh^3/12$
b = anchura media, mm (pulg.)
h = altura media, mm (pulg.)

- Las fracturas de flexión estática se clasifican de acuerdo con la apariencia de la superficie fracturada y la manera en la que se desarrolla la fractura, como se muestra en Figura A.64. De forma general, las fracturas pueden clasificarse como *quebradizas* y *fibrosas*. El término *quebradiza* indica una fractura abrupta y el término *fibrosa* indica una fractura que presenta astillado.

Informe

- Identificación, dimensiones, longitud del vano de la probeta y cualquier otra información relevante, como por ejemplo el grado de humedad.
- Diagrama de carga-deflexión.
- Módulo de fractura.
- Condición de fractura.

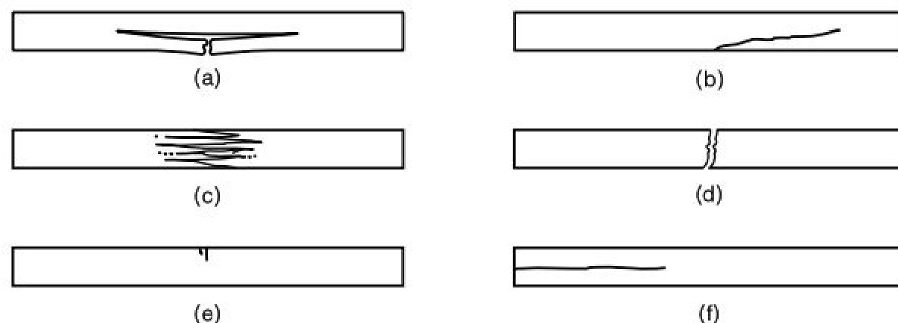


FIGURA A.64 Tipos de fractura en el ensayo de flexión estática: (a) tracción simple (vista lateral), (b) tracción transversal a la veta (vista lateral), (c) tracción de astillamiento (vista de la superficie de tracción), (d) tracción de quebrado (vista de la superficie de tracción), (e) compresión (vista lateral) y (f) cortante horizontal (vista lateral).

Ensayo de compresión paralela a la veta

En el método primario se utilizan probetas de 50 mm × 50 mm × 760 mm (2 pulg. × 2 pulg. × 30 pulg.) y de 25 mm × 25 mm × 410 mm (1 pulg. × 1 pulg. × 16 pulg.) para el método secundario. Al preparar las probetas asegúrese de que las superficies finales de veta son paralelas entre sí y de que forman ángulo recto con el eje longitudinal.

Aparato

Se necesita una máquina de deformación controlada. Al menos una de las platinas de la máquina de pruebas está equipada con un soporte esférico para obtener una distribución uniforme de la carga sobre los extremos de la probeta.

Procedimiento de prueba

1. Colocar la probeta perpendicularmente sobre el cabezal de la máquina, como se muestra en las Figuras 10.10(c) y 10.11.
2. Aplicar la carga de forma continua a lo largo del ensayo hasta fractura a una velocidad de 0,003 mm/mm de la longitud de la probeta por minuto.
3. Medir la deformación sobre la longitud nominal central no excediendo 150 mm (6 pulg.) para las probetas del método primario y 50 mm (2 pulg.) para las probetas del método secundario. Deben tomarse lecturas de la relación carga–compresión hasta superar sobradamente el límite de proporcionalidad, determinado a partir de la curva.

Análisis y resultados

- Dibuje el diagrama de la carga en función de la deflexión.
- Determine el módulo de elasticidad como la pendiente del tramo recto de la curva esfuerzo–deformación.
- Clasifique la fractura de compresión de acuerdo con la apariencia de la superficie fracturada (Figura 10.12). En el caso de que se desarrollen dos o más tipos de fractura, describa todas las superficies fracturadas en el orden en que hayan tenido lugar; por ejemplo, corte seguido de un astillado.

Informe

- Identificación, dimensiones de la probeta y cualquier otra información relevante, como por ejemplo el grado de humedad.
- Diagrama carga–deformación.
- Módulo de elasticidad.
- Condición de fractura.

Ensayo de compresión perpendicular a la veta

Se utilizan probetas de 50 mm × 50 mm × 150 mm (2 pulg. × 2 pulg. × 6 pulg.).

Aparatos

- Máquina de deformación controlada.
- Placa de soporte metálica con una anchura de 50 mm (2 pulg.).

Procedimiento de prueba

1. Colocar la probeta en la cabeza transversal de la máquina en la posición indicada en la Figura 10.10(d).
2. Aplicar la carga mediante una placa de soporte metálica de 50 mm (2 pulg.) de anchura, colocada sobre la superficie superior de la probeta y a la misma distancia de los extremos y formando ángulo recto con la longitud. Medir la anchura real de la placa de soporte. Las probetas deben colocarse de modo que la carga se aplique a través de la placa de soporte sobre una superficie radial. La carga se aplicará de forma continua a lo largo del ensayo a una velocidad de 0,305 mm/min (0,012 pulg./min).
3. Anotar las lecturas correspondientes a la carga y la deformación hasta una compresión de 2,5 mm (0,1 pulgadas) y después detener el ensayo. Medir la compresión entre las superficies de carga.

Análisis y resultados

- Diagrama de la carga en función de la deflexión.
- Determine el módulo de elasticidad como la pendiente de la parte recta de la curva esfuerzo–deformación.

Informe

- Identificación, dimensiones de la probeta y cualquier otra información relevante, como por ejemplo el grado de humedad.
- Diagrama carga–deformación.
- Módulo de elasticidad.

Experimento 30

Propiedades de tracción de los plásticos

Designación ASTM

ASTM D638M: *Tensile Properties of Plastics* (Propiedades de tracción de los plásticos).

Propósito

Determinar las propiedades de tracción de materiales plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo los compuestos.

Significado y uso

Este método de ensayo está diseñado para proporcionar datos de las propiedades de tracción para controlar y especificar los materiales plásticos. Estos datos también resultan útiles para la caracterización de la calidad del material y para los trabajos de investigación y desarrollo.

Aparatos

Máquina de pruebas, abrazaderas, indicador de carga e indicador de extensión.

Probetas de ensayo

Se utilizan probetas con una longitud total de 150 mm, una longitud nominal de 50 mm, una anchura de la sección estrecha de 10 mm y un espesor de 4 mm (Figura A.65) (probetas de Tipo M-I, ASTM D638M). Para los materiales isotrópicos, deben probarse al menos cinco probetas.

Procedimiento de prueba

1. Medir la anchura y el espesor de las probetas con un micrómetro adecuado redondeando los valores a un múltiplo de 0,02 mm en varios puntos a lo largo de la sección más estrecha.
2. Acondicionar las probetas de ensayo a una temperatura de 23 ± 2°C y una humedad relativa del 50 ± 5% durante no menos de 40 horas antes de realizar la prueba.
3. Colocar la probeta en las abrazaderas de la máquina de pruebas, teniendo cuidado de alinear el eje longitudinal de la probeta y las abrazaderas con la línea imaginaria que une los puntos de sujeción de las abrazaderas a la máquina.
4. Conectar el indicador de extensión (Figura A.66). Cuando se desee conocer el módulo, el indicador de extensión debe registrar continuamente la distancia que la probeta se estira (elongación) dentro de la longitud de medida, como una función de la carga en la parte inicial (lineal) de la curva carga–elongación.

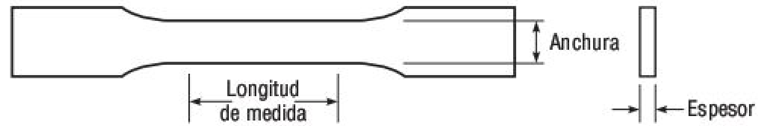


FIGURA A.65 Probeta de plástico para prueba de tracción.



FIGURA A.66 Extensímetro sobre la probeta de plástico.



FIGURA A.67 Prueba de tracción con una probeta de plástico.

5. Ajustar la velocidad del ensayo de modo que el cabezal móvil se desplace a una velocidad de 5 mm/minuto y poner en marcha la máquina (Figura A.67).
6. Registrar la curva carga–extensión de la probeta.
7. Registrar la carga y la extensión en el punto de fluencia (si existe) y en el momento de producirse la fractura.

Análisis y resultados

- La resistencia a la tracción es

  $$\sigma = P_{max}/A_o$$

  donde

  σ = resistencia a la tracción, MPa (psi)
  P_{max} = carga máxima soportada por la probeta durante la prueba a la tracción, N (lb)
  A_o = área original mínima de la sección transversal de la probeta, mm^2 ($pulg.^2$)

- Porcentaje de elongación

  Si la probeta da una carga de fluencia superior a la carga de fractura, calcular el porcentaje de elongación en un punto de fluencia. En caso contrario, calcular el porcentaje de elongación para fractura. Hacer esto leyendo la extensión (cambio en la longitud de medida) en el momento de alcanzar la carga aplicable. Dividir dicha extensión entre la longitud de medida original y multiplicar por 100.

- Módulo de elasticidad
  Calcular el módulo de elasticidad alargando la parte lineal inicial de la curva carga–extensión y dividiendo el incremento de esfuerzo en cualquier segmento de esta línea recta entre el correspondiente incremento de deformación. Calcular todos los valores de módulo de elasticidad utilizando en los cálculos el valor promedio del área de la sección transversal inicial de las probetas de ensayo.

Informe

- Identificación completa del material probado.
- Método de preparación de la probeta, tipo y dimensiones de la probeta y velocidad de la prueba.
- Resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad.



ÍNDICE

A

AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), 29
Abarquillamiento, 432
Ablandamiento por deformación, 10
Abrams, ley de, 222–223
Abrasión, 26
Absorbedor de impactos, 16
Absorción, 176
Acabado del hormigón, 278–280
Aceite caliente, curado del hormigón mediante, 273
Aceleradores, 237–238
Acero, 68, 90–143
  aleaciones de, 101–103
    agentes de aleación, 101–102
    características, 103
  armaduras de, 90, 114–117
    fabricación, 116
    tamaños estándar, 115
  calmado, 94
  corrosión, 133–135
    métodos de resistencia a la, 134–135
  de alta calidad (HPS), 109
  de baja relación, 117
  diagrama de fases hierro–carbono, 94–98
  distensionado, 117
  dulce, 10, 20
  ensayo de torsión (experimento), 498–500
    análisis y resultados, 500
    aparatos, 498
    probetas de ensayo, 498
    procedimiento de prueba, 499
  ensayo de tracción (experimento), 494–497
    análisis y resultados, 496–497
    aparatos, 494
    probetas de ensayo, 494
    procedimiento de prueba, 495–496
    sustitución de probetas, 497
  estructural, 90, 103–111
    aceros especiales en aplicaciones estructurales, 109–111
    tipos, 103–105
    tipos de secciones, 106–109
  inoxidable, 101
    propiedades, 111
  para hormigón pretensado, 117
  producción del, 91–94
    fases, 91
  productos de sujeción, 112
  prueba de impacto (experimento), 501–503
    aparato, 501
    condiciones de prueba, 501
    probetas de ensayo, 501
    procedimiento de prueba, 501–502
  pruebas mecánicas, 118–130
    de dureza, 128–130
    de flexión, 128
    de impacto con péndulo de Charpy, 125–127
    de tensión, 118–122
    de torsión, 122–125
    ultrasónicas, 130
  soldadura, 130–133
    a gas, 131
    con arco, 131
    métodos, 130
    zonas de, 132
  tratamiento térmico del, 98–100
    ejemplo, 100–101
    endurecimiento, 100
    normalización, 99
    recocido, 98–99
    templado, 100
ACI (*American Concrete Institute*), 249, 311
Adhesivos, 1
Aditivos, 241–242, 310
  necesidades en las mezclas de hormigón, 262
Aditivos cementosos suplementarios, 238–241
  ceniza en polvo, 239
  efecto sobre el hormigón endurecido, 242
  efectos sobre el hormigón recién mezclado, 241
  escoria de horno alto molida (escoria GGBF), 239
  humo de sílice, 240
  puzolanas naturales, 240–241

Aditivos con base de litio, 200
Aditivos de control de la hidratación, cemento portland, 236
Aditivos especializados, 241–242
Aditivos para asfalto
caucho, 405
plásticos, 405
Agente emulsionante, 338
Agentes de aireación
para mezclas de hormigón, 258–259
y permeabilidad, 290
Agentes para mejorar la adhesividad, aditivo para asfalto, 405
Aglomerados, 447
Aglomerantes asfálticos, 347, 357–364
ensayo con reómetro de cortante dinámica (experimento), 553–555
aparatos, 553
procedimiento de prueba, 553–555
especificaciones PG y criterios de selección, 357–360
métodos de clasificación, 361–363
viscosidad de (experimento), 551–552
aparatos, 551
procedimiento de prueba, 551–552
Agrietamiento por fatiga, pavimento, 397
Agua, contenido de (mezclas de hormigón), 260
Agua libre (madera), 422
Agua ligada (madera), 422
Aire atrapado, 219
Alabeo, 21, 432
Albura, 419
Aleaciones, 70–71
de acero, 101–103
de aluminio, 5, 146, 148, 151–152, 472
designaciones para el revenido, 152–154
propiedades, 156–159
Alfarería, 78
Alifática, 344
Alquitrán, 335
Alternativas al hormigón convencional, 300–312
cemento proyectado, 304–306
hormigón autoconsolidante (SCC), 301–302
hormigón compactado a rodillo (RCC), 311
hormigón compensador de la contracción, 309
hormigón de alta resistencia, 308–309
hormigón de altas prestaciones (HPC), 311–312
hormigón ligero, 306–307
hormigón pesado, 307–308
hormigón reforzado con fibra, 310
polímeros y hormigón, 309
relleno fluido, 302–304
Aluminio, 57, 144–166
coeficiente de expansión térmica, 158
conformación mediante rodillos, 149
conformación superplástica, 149
corrosión galvánica, 161
corrosión, 161
diagrama de fases del aluminio-cobre, 150
elementos de aleación, 148
ensayo de torsión (experimento), 498–500
análisis y resultados, 500
aparatos, 498
probetas de ensayo, 498
procedimiento de prueba, 499
ensayo de tracción (experimento), 494–497
análisis y resultados, 496–497
aparatos, 494
probetas de ensayo, 494
procedimiento de prueba, 495–496
sustitución de probetas, 497
estampación, 149
estirado, 149
estructuras, 144
extrusión, 149
fijación, 161
fundición en arena, 148
fundido, 148
laminado, 149
lingotes, 148
metalurgia del, 150–155
sistema de designación de las aleaciones, 151–152
tratamientos para el revenido, 152–155
métodos de moldeado y conformación, 149
moldeado por inyección, 149
operaciones de corte, 149
plegado, 149
producción, 146–148
propiedades, 155–160
pruebas, 155–160
puro, 144
reciclado, 148
resistencia a la tracción, 160
soldadura con arco, 161
soldadura GMAW, 161
soldadura GTAW, 161
ventajas, 146
y bauxita, 146
Amianto, 470
Amortiguador 16–19
AMRL (*American Material Reference Laboratory*), 29
Análisis de huecos y de la densidad, 369–373
Análisis granulométrico, 183–184
Angularidad, forma de partículas de árido, 171

Anillo de calibración, 40–41, 491
Anillos
anuales (árboles), 417
insaturados, 344
saturados, 344
Aniónica, emulsión, 339
Ánodo, 134
APF, 64–65
Aplicaciones estructurales (aceros especiales) 109–111
Árboles
anillos anuales, 417
anillos de crecimiento, 417
cambium, 417
coníferas, 418
corteza, 417
endógenos, 415
especies frondosas, 418
exógenos, 415, 418
médula, 417–419
Arcilla, productos de, 78
Árido fino
gravedad específica y absorción (experimento), 515–517
análisis y resultados, 517
aparatos, 515
procedimiento de prueba, 515–517
para mezclas de hormigón, 262
Árido grueso
gravedad específica y absorción (experimento), 512–514
análisis y resultados, 513–514
aparatos, 512
probetas de ensayo, 513
procedimiento de prueba, 513
Áridos 3, 167–210
absorción, 176
afinidad por el asfalto, 200
análisis granulométrico de (experimento), 506–511
análisis y resultados, 508
aparatos, 506
probetas de ensayo, 506
procedimiento de prueba, 506–508
angulares, 171
clasificación geológica, 168–169
condiciones de humidificación, 176
consistencia, 174–175
durabilidad, 174–175
dureza, 175
evaluación de las fuentes de, 169
fabricados, 167
forma de las partículas, 171–174
y hormigón de cemento portland, 170
fuentes de, 169
granulometría y tamaño máximo, 181–198
análisis granulométrico, 183–184
áridos de tamaño homogéneo, 188
especificaciones, 188–192
granulometría abierta, 188
granulometría de máxima densidad, 185–187
granulometría discontinua, 188
mezcla de áridos para cumplir las especificaciones, 193–196
módulo de finura, 192
propiedades de los áridos mezclados, 196–198
gravedad específica, 177–179
gruesos para mezclas de hormigón, 256–258
hidrófilos, 200
hidrófobos, 200
húmedos, 176
Los Angeles, prueba de abrasión, 175
manipulación, 200–202
materiales base, 170
mezclados, 193–196
propiedades, 196–198
módulo de elasticidad, 181
módulo de resiliencia, 180
montones de, 201
muestreo, 201–202
peso específico en seco y huecos de (experimento), 518–520
análisis y resultados, 520
aparatos, 518
procedimiento de prueba, 518–519
propiedades, 171–200
reactividad álcali–árido, 198–200
resistencia a la abrasión, 175
resistencia y módulo, 180
rocas ígneas, 169
rocas metamórficas, 169
rocas sedimentarias, 168–169
sintéticos ligeros, 2
sustancias nocivas en, 198–199
tamaño máximo de las partículas de árido, 181, 202
tamaño máximo nominal, 183, 202
tenacidad, 175
textura superficial, 171–174
usos, 170–171
Armaduras de acero, 90, 114–117, 478–479
fabricación, 116
tamaños estándar, 115–116
Arrabio, 91–92
Asfaltenos, 345

Asfalto, 335–414
aditivos, 404–405
agentes para mejorar la adhesividad, 405
caucho, 405
extendedores, 405
plásticos, 405
rellenos, 405
aglomerantes asfálticos, 357–363
análisis de huecos y de densidad, 369–373
aplicaciones en pavimentación, 342
cantidad/calidad del, 335
caracterización, 347–356
de emulsiones y asfaltos fluidificados, 356
enfoque de caracterización PG, 347
PG de los aglomerantes, 348–354
pruebas tradicionales de, 354
clasificación, 357–364
consistencia, 342
diseño de mezclas de hormigón asfáltico, 366–397
disolución en un disolvente, 338
dispersión de agua como emulsión, 338–339
emulsionado, 338–339
emulsiones asfálticas, 338, 364
especificaciones PG para aglomerantes asfálticos, 338
esquemas de fraccionamiento de los componentes, 345
fluidificado, 338, 363
hormigón asfáltico, 364
caracterización, 397–401
modelos reológicos, 401
preparación de probetas en el laboratorio, 366–369
producción de, 401–402
prueba de congelación y descongelación, 400–401
prueba diametral de determinación del módulo de resiliencia, 398–400
reciclado del, 402–404
resistencia indirecta a la tracción, 398
líquido, 338–339
moléculas, 345
pavimento asfáltico, cargas, 397
propiedades químicas, 344–346
separación basándose en el tamaño molecular, 345
Superpave, diseño de mezclas, 338
susceptibilidad térmica del, 342–344
tipos de productos asfálticos, 338–339
Trinidad, lago, 335
usos, 339–342
viscosidad absoluta del (experimento), 558–559
análisis y resultados, 559
aparatos, 558
procedimiento de prueba, 558–559
Asfalto de mezcla en caliente (HMA), 364
densidad de probeta de, con el compactador giratorio Superpave (experimento), 560–563
análisis y resultados, 562–563
aparatos, 560
procedimiento de prueba, 560–562
Asociación norteamericana de industrias especiales del acero (SSINA), 102
ASTM (*American Society for Testing and Materials*), 29
Atáctico (polímeros), 82
Átomos
de aleación, 71
intersticiales, 71
sustitucionales, 71
Azufre (agente de aleación del acero), 102

B

Bacterias y madera, 442
Baja relación, aceros de, 117
Bandas de savia (defecto de la madera), 428
Barras de acero, 114
Bauxita, 146
BCC, estructura centrada en el cuerpo, 63, 65
Bituminosos, materiales, 335
Blaine, finura de, 224
Bloques de hormigón, 321
Bolsa resinífera (defecto de la madera), 431
Burgers, modelo de, 18–19, 401

C

Cadena lineal polimérica, 82
Caducifolios, árboles, 417
Calcio, 57
Calor específico (madera), 433–434
Cambium (árboles), 417
Capacidad de amortiguación (madera), 436
Características de los materiales
estéticas, 27
superficiales, 26
Caracterización PG de los aglomerantes, 348–354
ensayo con reómetro de cortante dinámica, 351–352
ensayo de viscosidad rotacional (Brookfield), 350
envejecimiento a presión (PAV), 349
horno de película delgada rodante (RTFO), 348–349
prueba de tracción directa, 353
punto de inflamabilidad, prueba de, 350

reómetro de flexión, 352
Carbono, acero con contenido de, 120
Carburo de hierro, 95–97
Cargas
aleatorias, 4–5
constantes (propias), 4
dinámicas, 4–5
transitorias, 4–5
Catiónica, emulsión, 339
Cátodo, 134
Caucho
aditivo para asfalto, 405
blando, 6
Cavidades (materiales), 67
CDF (*Controlled Density Fill*), 302
Celda de carga, 41–42, 491–492
Celda unitaria, 61
Cementita, 100
Cemento (material inorgánico), 78
Cemento asfáltico, 338, 345
prueba de penetración (experimento), 556–557
aparatos, 556
procedimiento de prueba, 557
Cemento de escoria (Tipo S), 227
Cemento hidraúlico mezclado, 227
Cemento portland, 211–247, *Véase también* Hormigón de cemento portland
aditivos, 229–242
aceleradores, 237–238
agentes de aireación, 231–232
cementosos suplementarios, 238–241
de control de la hidratación, 236
especializados, 241–242
reductores de agua, 232–235
retardantes, 236
agua para la mezcla, 227–229
criterios de aceptación, 228
eliminación del agua de lavado, 228–229
reutilización del agua de lavado del hormigón, 228–229
blanco, 227
cemento hidratado
consistencia, 221
fraguado, 220–221
huecos, 219
propiedades, 219–222
resistencia a la compresión, 222
composición química, 212–213
con escoria de horno alto (Tipo IS), 227
definición, 211
desarrollo de la estructura en la pasta de cemento, 217
finura, 213–214
gravedad específica, 214
hidratación, 215–218
modificado con puzolana (Tipo I(PM)), 227
producción, 211–212
puzolana (Tipos IP y P), 227
tipos, 224–227
Cemento proyectado, 304–306
Cemento, mortero de, 329
Cemento–cal, mortero de, 329
Cementos especiales, 227
Cementos expansivos (tipo K), 227
Ceniza fina, 306
Centistokes (cSt), 356
Cerámicas vítreas, 78
Cerámicos, materiales, 78–80
clases, 78
de gama alta, 78
Chace, indicador de aire de, 277
Chapas de forro, 460
Charpy, prueba de impacto con péndulo de, 125–127
Clasificación estructural de la madera, 427–428
Cloruro de calcio, alternativas al uso de, 237–238
CLSM (*Controlled Low-Strength Material*), 302
Cobre, 57
como agente de aleación del acero, 102
Coeficiente de expansión térmica, 24–25
de la madera, 434
Compactador amasador California, 367–369
Compactador giratorio Superpave, 367
Comportamiento de los materiales, 54–59
Comportamiento elástico, 9
Comportamiento elastoplástico, 9–13
Compresión, 57
Compuestos, 1–2, 468–488
definición, 468
esquema de clasificación, 469
macroscópicos, 469, 478–480
hormigón asfáltico, 479
hormigón de cemento portland normal, 478
hormigón de cemento portland reforzado, 478–479
madera manufacturada, 480
membranogénicos, 283–284
microscópicos, 469–477
aplicaciones de ingeniería civil, 472–477
compuestos reforzados con fibra, 469, 470–471
compuestos reforzados con partículas, 469, 471
fabricación, 472
fase dispersa (fase de refuerzo), 469
fase matriz, 469, 472
propiedades, 480–485
carga paralela a las fibras, 481–483

Compuestos (*continuación*)
- propiedades, 480–485
  - carga perpendicular a las fibras, 483–484
  - compuestos de fibras orientadas aleatoriamente, 484–485
  - compuestos reforzados con partículas, 485

Condiciones de carga, 4–5
Conductividad eléctrica, 483, 484
Conductividad térmica, 483, 484
Conductor, 134
Conexiones empernadas, 112
Conexiones remachadas (acero), 112
Conformación mediante rodillos (aluminio), 149
Conformación superplástica (aluminio), 149
Coníferas, 417, 418
Construcción, 27
Contenido de humedad de equilibrio (EMC), 423
Contorno coherente, 68–70
Contornos de grano, 69–70
Contracción de secado, 281, 287
Contracción plástica (hormigón), 287
Contrachapado, 480
- propiedades mecánicas del, 448

Copa abierta de Cleveland, 350
Corrosión, 26
- acero, 133–135
- definición, 133
- galvánica (aluminio), 161

Corteza (árboles), 417
Covalente, enlace, 58–59
CPSC (*Consumer Product Safety Commission*), 445
Cromo, 57
- como agente de aleación del acero, 102

C-S-H, 217
Cubiertas húmedas, 282
Curación del asfalto fluidificado, 363
Curado de la madera, 426–427
Curado del hormigón de cemento portland, 280–287
- compuestos membranógenos, 283–284
- conservación de los encofrados, 286
- cubiertas aislantes, 286
- cubiertas húmedas, 282
- curado por vapor, 286
- eléctrico, 287
- infrarrojos, 287
- inmersión, 282
- inundación, 282
- láminas de plástico papel impermeables, 282
- nebulización, 282
- periodo de curado, 287
- por aceite caliente, 287
- pulverización, 282

Curado eléctrico (hormigón), 287

D

Defectos de área, 67
Defectos de la retícula, 67
Defectos de volumen, 67
Defectos lineales, 67
Defectos puntuales, 67
Deformación excesiva, 22
Deformación plástica, 66–68
Deformaciones (defecto de la madera), 432
Deformación–tiempo, curvas, 19
Degradación, 26
Densidad, 23–24
- madera, 432–433
- materiales metálicos, 66
- y gravedad específica, 177

Depósito del hormigón, 271
Descomposición (madera), 441
Desconchones (defecto de la madera), 432
Desmoronamiento de pavimentos, 397
Desmulsificación, 339
Destilación de asfaltos fluidificados y emulsiones asfálticas, 356
Desviación típica, 30–31
Diagrama de fases hierro–carbono, 94–98
Diagramas de control, 31–33
- estadístico 31–32
- tipos, 31
- ventajas, 31

Diagramas de fase, 71–77
- análisis de la línea de equilibrio de los, 96
- materiales insolubles, 75–76
- materiales parcialmente solubles, 76
- materiales solubles, 72–74
- reacción eutectoide, 76–77

Diamante, 59, 79
Difusividad, 483, 484
- térmica (madera), 434

Dislocación de borde, 67
Disoluciones basadas en petróleo (preservación de la madera), 443
Dispositivos de compactación giratorios, 367–368
Dispositivos de medida (experimento), 490–493
- aparatos, 490–491
- calibración, 491–493
- requisitos, 493

Distancia de equilibrio, 57
Distensionado, acero, 117
Distribución del hormigón, 278
Distribución normal, 30
Dúctil, material, 11

Duramen, 419

E

E-Glass, 470
Elasticidad, 6
Elástico, material, 6
Elastómeros, 81
Electrolito, 134
Electrones, 54
comportamiento de, 52
configuración, 54–57
de valencia, 56
distancia entre el núcleo y, 54
nivel de energía de, 55
orbital o capa, 55–56
subcapas, 55
Elementos de mampostería de hormigón, 321–326
absorción de agua, 323–324
clases, 322
de carga, 322
de no carga, 322
dimensión especificada (modular), 324–325
dimensión nominal, 324–325
mezcla de hormigón utilizada en la fabricación de, 322
sólidos, 325
Elementos especiales de madera, 424
Elementos estructurales compuestos, 460
Eliminación del agua de lavado del hormigón, 228–229
EMC (*Equilibrium Moisture Content*), 423
Emulsión
aniónica, 339
asfáltica, 338, 364
catiónica, 339
Endógenos, árboles, 415
Endurecimiento
comparación con el fraguado, 220
del acero, 100
por deformación, 10
por tratamiento mecánico, 10
Energía, 13
Enlaces, 57–61
clasificación de materiales según el tipo de enlace, 61
covalentes, 58–60
interatómicos, 58
iónicos, 58–60
metálicos, 58–60
primarios, 57–58
secundarios, 58, 60
Enlucido, 330
Ensayo de compresión paralela a la veta (madera), 576
Ensayo de compresión perpendicular a la veta (madera), 577
Ensayo de flexión estática (madera), 437–438, 573–575
Ensayos con elementos de mampostería de hormigón (experimento), 548–550
análisis y resultados, 550
aparatos, 548
procedimiento de prueba para determinar la absorción, 549
procedimiento de prueba para determinar la resistencia a la compresión, 548
Ensayos de compresión (madera), 438–440
Entrecorteza (defecto de la madera), 431
Envejecimiento a presión (PAV), 349
Equipos de medida de laboratorio, 34–42
anillo de calibración, 40–41
celda de carga, 41–42
exactitud de la medida, 35
galgas, 35–36
galgas extensimétricas, 38–40
sensibilidad de, 35
transformador diferencial variable lineal (LVDT), 36–38, 491–493
Equivocación, 28
Error, 28, 33–34
Escarabajos y madera, 442
Esclerómetro, prueba con el, 298
Escoria de horno alto molida (GGBF), 239
Esfuerzo de fluencia, 11
Esfuerzo–deformación
curva, 11
curva de cálculo, 120
curva real, 120
para compresión, curvas, 5
para la tracción, diagrama para el acero, 121
para tracción, curvas monoaxiales, 5
relaciones, 4
Esfuerzos, 25
Espacio de hidratación intercapas, 219
Especificaciones granulométricas de los áridos, 188–192
Estabilidad del SCC, 302
Estampación (aluminio), 149
Estática, carga, 4
Estirado (aluminio), 149
Estructura cristalina, metales/sólidos inorgánico, 61
Estructura granular, 67–70
Estructura reticular, 62–67
cúbica centrada en el cuerpo (BCC), estructura, 63, 65

Estructura reticular (*continuación*)
cúbica centrada en las caras (FCC), estructura, 63, 65
de los metales (tabla), 64
factor de empaquetamiento atómico (APF), 64–65
mallas cerradas hexagonales (HCP), estructura de, 63, 65
número de coordinación, 64
retícula espacial, 63
Estructural, acero, 90, 103–111
aceros especiales en aplicaciones estructurales, 109–111
tipos, 103–105
tipos de secciones, 106–109
Estuco, 330
Exactitud, 29
Exógenos, árboles, 415
Extendedor, aditivo para asfalto, 405
Extensímetros, 36, 119, 491
sin contacto, 353
Extrusión (aluminio), 149
Extrusión por estirado, 473

F

Facilidad de trabajo, definición, 259
requisitos para mezclas de hormigón, 259
Factor de desplazamiento tiempo–temperatura, 20
Factor de empaquetamiento atómico (APF), 64–65
Factor de seguridad (FS), 22
Factores económicos en el proceso de selección de materiales, 2–3
Fallos, 21–23
alabeo, 21
catastróficos de un elemento estructural, 4
deformación excesiva, 22
fatiga, 21
fluencia general, 21
fractura, 21
funcional, 4
Falso fraguado (hormigón), 221
Fases, 71
Fatiga, 21
FBA (ladrillos de cara vista arquitectónicos), 328
FBS (ladrillos de cara vista estándar), 328
FBX (ladrillos de cara vista extra), 328
FCC, estructura centrada en las caras, 63
Fendas (defecto de la madera), 428
Fendas de secado (defecto de la madera), 432
Fenol–formaldehído (PF) en paneles/chapas estructurales, 448
Ferrita, 95–96, 100
Ferrosos, metales, 90
Fibra aramídica (Kevlar), 470
Fibra de vidrio, 471–477
Fibrillas, 421, 470
Fluencia general, 21
Fluidificado, asfalto, 338, 363
Fluidos newtonianos, 14
Flujo de ceniza fina, 302
Flujo viscoso, 14–15
Foliación, forma de las partículas de árido, 171
Fractura, 21
Frágil, material, 11
y fracturas, 21
Fraguado
comparación con el endurecimiento, 220
emulsión, 339
instantáneo (hormigón), 215
rápido, 215
Frondosas, especies, 418
FSP (*Fiber Saturation Point*), 422
Fuentes naturales de áridos, 167
Fuerza–desplazamiento, diagrama, 13
Fundición en arena (aluminio), 148

G

Galga de alambre, 39
Galgas, 35–36, 118, 490
extensimétricas, 38–39, 491
Gas, soldadura a, 131–132
Gemas (defecto de la madera), 428
Geotextiles, 1
GGBF (*Ground granulated blast furnace*), escoria, 239
Gillmore, prueba de, 220
Glulam, 454–459
Gomas, 81
Grafito, 470, 471
Grano, tamaño de, 70
Granulometría
abierta (áridos), 188
de los áridos, 181–198
de máxima densidad, 185–187
discontinua (áridos), 188
Grava, 167
Gravedad específica, 23–24, 177–179
aparente, 177
cemento portland, 214
efectiva (áridos), 178
en estado saturado con superficie seca, 177
en estado seco, 177
escoria GGBF, 240
madera, 432–433

Gravimétrico, método, 276
Grietas inducidas por contracción, 288

H

Hall–Héroult, proceso, 146
HCP, estructura de mallas cerradas hexagonales, 63–65
Hemicelulosas, 421
Hidratación mediante solución, 215
Hidratación topoquímica, 215
Hidrófilos, áridos, 200
Hidrófobos, áridos, 200
Hierro fundido, 90, 92
Hinchazón (hormigón), 288
Hipoeutectoide, aleación, 96–97
HMA. *Véase* Asfalto de mezcla en caliente (HMA)
Hongos (madera), 441–442
Hooke,
  elemento de, 15
  ley, 5, 14
  Robert, 4
Hormigón, 5, 78. *Véase también* Hormigón asfáltico; Elementos de mampostería de hormigón; Alternativas al hormigón convencional; Probetas de hormigón cilíndricas; Hormigón mezclado fresco; Hormigón endurecido; Hormigón de cemento portland
  amasado, 270
  autoconsolidante (SCC), 301–302
  bombeado, 271
  compensador de la contracción, 309
  con armadura de acero, 478–479
  con impregnación polimérica, 309
  de altas prestaciones (HPC), 311–312
  ligero, 306–307
  mezclado con dosificador móvil, 271
  mezclado en fábrica, 270
  parcialmente premezclado, 270
  pesado, 307–308
  polimérico, 309
  polimérico de cemento portland, 309
  premezclado, 270
  reforzado con fibra, 2, 310, 468, 475
  reptación, 14–15
  resistencia a la flexión del (experimento), 540–542
    análisis y resultados, 541–542
    aparatos, 540
    probetas de ensayo, 540
    procedimiento de prueba, 540–541
Hormigón asfáltico, 364, 479
  caracterización, 397–401
  diseño de mezclas de, 366–397
  Marshall, método de diseño de hormigón asfáltico, 366–369, 387–394
    análisis de huecos y densidad, 388
    determinación del contenido de asfalto de la mezcla, 388
    evaluación de áridos, 387
    evaluación del cemento asfáltico, 387
    fórmula inicial de la mezcla (JMF), 392
    medida de flujo y de la estabilidad Marshall, 388–389
    preparación de las probetas, 387–388
  modelos reológicos, 401
  preparación de probetas con el compactador de Marshall (experimento), 564–567
    aparatos, 564
    procedimiento de prueba, 564–567
  preparación de probetas en el laboratorio, 366–369
  producción, 401–402
  prueba de congelación y descongelación, 400
  prueba diametral de determinación del módulo de resiliencia, 398–400
  reciclado, 402–404
  resistencia indirecta a la tracción, 398
  y áridos, 170–171
Hormigón de cemento portland, 10, 61, 78, 248–319, 468. *Véase también* Cemento portland
  alternativas al hormigón convencional, 300–312
    cemento proyectado, 304–306
    hormigón autoconsolidante (SCC), 301–302
    hormigón compactado a rodillo (RCC), 311
    hormigón compensador de la contracción, 309
    hormigón de alta resistencia, 308–309
    hormigón de altas prestaciones (HPC), 311–312
    hormigón ligero, 306–307
    hormigón pesado, 307–308
    hormigón reforzado con fibra, 310
    polímeros y hormigón, 309
    relleno fluido, 302–304
  contenido de aire, medida en el hormigón fresco, 275–278
  curado del, 280–287
    compuestos membranógenos, 283–284
    conservación de los encofrados, 286
    cubiertas aislantes, 286
    cubiertas húmedas, 282
    curado por vapor, 286
    eléctrico, 287
    infrarrojos, 287
    inmersión, 282
    inundación, 282
    láminas de plástico papel impermeables, 282

Hormigón de cemento portland (*continuación*)
curado del, 280–287
nebulización, 282
periodo de curado, 287
por aceite caliente, 287
pulverización, 282
depósito del hormigón, 271
distribución y acabado, 278–280
dosificación, 269
errores y precauciones a la hora de mezclar agua, 275
hidratación, 280
hormigón bombeado, 271
hormigón mezclado con dosificador móvil, 271
hormigón premezclado, 270–271
mezclado, colocación y manipulación del hormigón fresco, 269–279
normal, 478
propiedades del hormigón endurecido, 287–292
cambio inicial de volumen, 287–288
permeabilidad, 289–290
relación esfuerzo-deformación, 290–292
reptación, 288
proporciones de las mezclas de hormigón, 249–269
pruebas del hormigón endurecido, 292–300
de compresión diametral, 295–296
de maduración, 300
de resistencia a la compresión, 293–295
de resistencia a la flexión, 296–297
de resistencia a la penetración, 298
de velocidad de pulsos ultrasónicos, 299
del esclerómetro, 298
vibración, 274
y áridos, 170
Hormigón endurecido
número esclerométrico del (experimento), 543–544
aparato, 543
condiciones de prueba, 544
procedimiento de prueba, 544
propiedades del, 287–292
cambio inicial de volumen, 287–288
permeabilidad, 289–290
relación esfuerzo-deformación, 290–292
reptación, 288
pruebas del, 292–300
prueba de compresión diametral, 295–296
prueba de maduración, 300
prueba de resistencia a la compresión, 293–295
prueba de resistencia a la flexión, 296–297
prueba de resistencia a la penetración, 298
prueba de velocidad de pulsos ultrasónicos, 299
prueba del esclerómetro, 298
resistencia a la penetración del (experimento), 545–547
aparatos, 545
procedimiento de prueba, 545–547
Hormigón mezclado fresco
asentamiento del (experimento), 521–523
determinación del contenido de aire por el método de presión (experimento), 527–528
aparatos, 527
procedimiento de prueba, 527–528
determinación del contenido de aire por el método volumétrico (experimento), 529–530
aparatos, 529
calibración, 529
procedimiento de prueba, 529–530
peso específico y fluencia del (experimento), 524–526
análisis y resultados, 525–526
aparatos, 524
procedimiento de prueba, 524–525
Horno
básico de oxígeno, 92
de película rodante (RTFO), 348–349
de reverbero, 92–93
eléctrico, 92–93
madera secada en, 426
HPC (High-Performance Concrete), 311–312
Huecos capilares, 219
Humedad, correcciones de la (mezclas de hormigón), 263
Humedad libre (áridos), 176
Hume–Rothery, reglas, 71
Humo de sílice, 240, 306
Hveem, metodo de diseño de mezclas de hormigón asfáltico, 366, 369, 395–396
pasos, 395
susceptibilidad a la humedad, evaluación de, 396–397

I

Incoherente, contorno de grano, 69–70
Índice visual de estabilidad (VSI), 302
Infrarrojos, curado del hormigón mediante, 287
Ingeniería civil, materiales utilizados en, 61
Ingeniería mecánica
características estéticas de los materiales, 27
construcción, 27
equipos de medida de laboratorio, 34–42
anillo de calibración, 40–41

celda de carga, 41–42
exactitud de la medida, 35
galgas extensimétricas, 38–40
galgas, 35–36
sensibilidad de los, 35
transformador diferencial variable lineal (LVDT), 36–38, 491–493
producción, 27
propiedades no mecánicas de los materiales, 23–26
variabilidad de los materiales, 27–34
diagramas de control, 31–33
distribución normal, 30–31
equivocación, 28
error, 28
error experimental, 33–34
exactitud, 29
muestreo, 29–30
precisión, 29
sesgo, 29
Ingenieros civiles y de la construcción, responsabilidades, 1
Ingenieros civiles y el control de calidad del hormigón de cemento portland, 248
Ingenieros de la construcción y control de calidad del hormigón de cemento portland, 248
Ingenieros de materiales, responsabilidades de, 1
Ingenieros geotécnicos, responsabilidades, 1
Inmersión, 282
Insectos y madera, 442
Insoluble, material, diagramas de fase, 75–76
Instituto americano del hormigón (ACI), 249, 311
Instituto Nacional de Estandarización (NSI), 436
Interatómico, enlace, 58
Inundación, 282
Iónico, enlace, 58–59
Isocianato (paneles/chapas estructurales), 448
Isodeformación, condición de, 481
Isotáctico (polímeros), 82
Isótopos, 54

J-K-L

Juntas de unión, 25

Kelvin, modelo de, 17–18
Kevlar, 470

Laboratorio, manual, 489–580
aglomerante asfáltico
ensayo con reómetro de cortante dinámica, 553-555
viscosidad de, 551–552
análisis granulométrico de áridos, 506–511
asentamiento del hormigón de cemento portland mezclado fresco, 521–523
contenido de aire del hormigón mezclado fresco
método de presión, 527–528
método volumétrico (experimento), 529–530
densidad de probetas de asfalto mezclado en caliente con el compactador giratorio Superpave, 560–563
dispositivos de medida, 490–493
ensayo de torsión para el acero y el aluminio, 498–500
ensayo de tracción del acero y el aluminio, 494–497
ensayos con elementos de mampostería de hormigón, 548–550
estabilidad y flujo de Marshall del hormigón asfáltico, 571–572
gravedad específica en seco de mezclas bituminosas compactadas, 568–570
gravedad específica y absorción
de áridos finos, 515–517
de áridos gruesos, 512–514
hormigón endurecido
número esclerométrico del, 543–544
resistencia a la penetración de, 545–547
inspección microscópica de materiales, 504–505
peso específico en seco y huecos en los áridos, 518–520
peso específico y fluencia del hormigón mezclado fresco, 524–526
preparación de probetas de hormigón asfáltico con el compactador de Marshall, 564–567
preparación y curado de probetas de hormigón, 531–534
probetas de hormigón cilíndricas, refrentado con azufre o un compuesto de recubrimiento, 535–539
propiedades de tracción de los plásticos, 578–580
prueba de impacto del acero, 501–503
prueba de penetración del cemento asfáltico, 556–557
pruebas de flexión y compresión para la madera, 573–577
resistencia a la flexión del hormigón, 540–542
viscosidad absoluta del asfalto, 558–559
Ladrillos 78, 320
de adoquinado, 326
de arcilla sólidos, 320, 326–329
absorción, 326
características, 327
definición, 326

Ladrillos (*continuación*)
de arcilla sólidos, 320, 326–329
dimensión especificada (modular), 329
dimensión nominal, 329
resistencia a la compresión, 327
tipos, 326
de cara vista, 326, 327–328
de construcción, 326–327
de hormigón, 321, 325
de suelo, 326
estructurales, 320–321
modulares, 329
no modulares, 329
Laminado (aluminio), 149
Láminas de plástico o papel impermeables, 282
Lechada de cemento, 330
Ley de Hooke generalizada, 7
Lignina, 421
Límite de elasticidad, 9, 11
Límite de proporcionalidad, 11
Límite de resistencia a la fatiga, 21
Límites de control, 33
Lineal, material, 8
Linealidad, 8
Los Ángeles, prueba de abrasión, 175
Lote, 29
LSL. *Véase* Madera de tiras laminada
LVDT (*Linear variable differential transformer*), 36–38, 491–493
LVL. *Véase* Madera de chapas laminada

M

Macroscópicos, compuestos. *Véase* Compuestos macroscópicos
Madera, 415–467. *Véase también* Árboles. Madera manufacturada
anillos de crecimiento, 417–419
aserrada, 424
aserrado combinado, 425
aserrado normal, 425
aserrado por cuartos, 425
calor específico, 433–434
capacidad de amortiguación, 436
clasificación estructural, 427–428
coeficiente de expansión térmica, 434
composición química, 421
consideraciones de diseño, 440–441
curado, 426–427
de chapas laminada (LVL), 451–452, 480
de reacción (defecto de la madera), 428
de tiras laminada (LSL), 453–454
de tiras orientadas (OSL), 452, 453, 480
de tiras paralelas, 452–453, 480
defectos de, 428–432
definición, 415, 417
degradación de, 441–442
bacterias, 442
hongos, 441–442
insectos, 442
organismos marinos, 442
densidad, 432–433
difusividad térmica, 434
en rollo, 424
ensayos, 436–440
de compresión, 438–440
de flexión estática, 437–438
estructura de la, 417–419
flujo de calor, 433
grado de humedad, 421–423, 433
gravedad específica, 432–433
labrado (aplanado) de superficies de, 424
módulo de elasticidad, 435
naturaleza anisotrópica, 419–420
preservación de la, 443–445
disoluciones basadas en petróleo, 443
precauciones de construcción, 444–445
preservantes hidrosolubles, 443
técnicas de aplicación, 444
producción, 423–427
productos manufacturados de, 424, 445–460
elementos estructurales compuestos, 460
formas estructurales, 449–459
madera estructural compuesta (SCL), 451
paneles/chapas estructurales, 447–449
propiedades
de resistencia, 435
eléctricas, 434
físicas, 432–433
mecánicas, 434–436
térmicas, 433–434
pruebas de compresión y de flexión (experimento), 573–577
ensayo de compresión paralela a la veta, 576
ensayo de compresión perpendicular a la veta, 577
ensayo de flexión estática, 573–575
reptación, 436
secada al aire, 427
secada en horno, 426
técnicas de corte, 425–426
tratada a presión, 445
Madera manufacturada, 423–424, 445–460, 478, 480
elementos estructurales compuestos, 460
formas estructurales, 449–459

madera de chapas laminadas (LVL), 451–452
madera de tiras laminada (LSL), 453–454
madera de tiras orientadas (OSL), 452–453
madera de tiras paralelas, 452–453
madera laminada–encolada, 454–459
madera estructural compuesta (SCL), 449–450
paneles/chapas estructurales, 447–448
Mallas de alambre corrugadas, 114
Maltenos, 345
Mampostería, 320–334
cementos para, 227
elementos de, 320–329
Manchas (madera), 441
Manganeso (agente de aleación del acero), 102
Marshall, estabilidad y flujo de, del hormigón asfáltico (experimento), 571–572
aparatos, 571
procedimiento de prueba, 571–572
Marshall, método de diseño de hormigón asfáltico, 366–369, 387–394
análisis de huecos y densidad, 388
determinación del contenido de asfalto de la mezcla, 388
evaluación de áridos, 387
evaluación del cemento asfáltico, 387
fórmula inicial de la mezcla (JMF), 392
medida de flujo y de la estabilidad Marshall, 388–389
preparación de las probetas, 387–388
Martensita, 100
Masa atómica, 54
Materiales basados en láminas de chapa (madera), 447–448
Materiales de ingeniería, 1–53. *Véase* Materiales, fundamentos. Materiales, propiedades mecánicas. Materiales, propiedades no mecánicas
avances en la tecnología de los, 1
cementosos, contenido de (mezclas de hormigón), 262
compuestos reforzados con fibra, 2
de alta resistencia, 13
material controlado de baja resistencia, 302
material tenaz, 13
naturaleza y comportamiento, 2
parcialmente solubles, diagramas de fase, 76
Materiales, fundamentos
conceptos, 54–61
configuración electrónica, 54–57
electrones, 54
elementos, 54
enlaces, 57–61
isótopos, 54
masa atómica, 54
materiales metálicos, 61–77
neutrones, 54
número atómico, 54
protones, 54
sólidos inorgánicos, 77–80
sólidos orgánicos, 80–86
Materiales, inspección microscópica de (experimento), 504–505
aparato, 504
material, 504
Materiales, propiedades mecánicas, 3–22
comportamiento elástico, 6–9
comportamiento elastoplástico, 9–13
condiciones de carga, 4–5
efectos de la temperatura y el tiempo, 19–20
fallos, 21–23
modelos reológicos, 15–19
relación esfuerzo-deformación, 4
respuesta dependiente del tiempo, 14–15
seguridad, 21–23
trabajo y energía, 13
Materiales, propiedades no mecánicas, 23–26
características superficiales, 26
densidad, 23–24
expansión térmica, 24–25
gravedad específica, 23
Maxwell, modelo de, 17
Media aritmética, 30–31
Medidor de maduración, 300–301
Médula (árboles), 417–419
Melamina–formaldehído (MF), en paneles/chapas estructurales, 448
Metales, 472
conformados en frío, 1
reptación, 13
densidad, 66
ferrosos, 90
soldadura con arco protegido, 131
soldadura GMAW, 161
Metálico, enlace, 58–60
Metálicos, materiales, 61–77
aleaciones, 70–71
celda unitaria, 61
defectos de la retícula, 67
densidad, 66
diagramas de fase, 71–77
efectos combinados, 77
estructura granular, 67–70
estructura reticular, 62–67
Metalurgia del aluminio, 150–155
sistema de designación de aleaciones, 151–152
tratamientos para el revenido, 152–154

Mezclas bituminosas compactadas
gravedad específica en seco de (experimento), 568–570
análisis y resultados, 568–570
aparatos, 568
probetas de ensayo, 568
procedimiento de prueba, 568
Mezclas de hormigón, proporciones para las, 249–269
Mezclas de prueba (hormigón), 263
Microscópicos, compuestos. *Véase* Compuestos microscópicos
Módulo
de cuerda, 8, 291
de elasticidad, 6
hormigón, 291–292
madera, 435
de finura, 192
de resiliencia, 13
de secante, 8
de tangente, 8
de tangente inicial, 8
Moldeado por inyección (aluminio), 149
Molibdeno (agente de aleación del acero), 102
Mortero, 329–330
de cal, 329
de cemento, 329
de flujo, 302
resistencia a la compresión de, 222, 329
resistencia a la tracción de la unión, 330
Muestreo, 29–30
aleatorio, 30
de áridos, 201–202
MW, calidad de ladrillos de construcción, 327

N

N, calidad de elementos de mampostería de hormigón sólidos, 325
Naturaleza de los materiales, 54–89
Nebulización (hormigón), 282
Neopreno, 81
Neutrones, 54
Newton, elemento de, 15
Níquel (agente de aleación del acero), 102
Normalización (acero), 98–99
NSI (*National Standard Institute*), 436
Nudos (defecto de la madera), 428
Número
atómico, 54
de coordinación, 64
NW, calidad de ladrillos de construcción, 327
Nylon, 470

O-P-Q

Operaciones de corte (aluminio), 149
Organismos marinos (madera), 442

Paja, 468
Paneles compuestos, 480
Paneles estructurales aislados, 460
Papel aislante, 282
Parafínico, 345
Partículas
redondeadas, 171
subangulares, 171
Pasta de cemento, 215
consistencia, 221
desarrollo de la estructura de la, 217
Patrones de aserrado, 425–426
PAV, 349
Pavimentos, reciclado de materiales para. *Véase* Reciclado de materiales para pavimentos
Penetración, prueba de, 354
Perlita, 95–97
Permeabilidad y hormigón, 289–290
Pernos
aluminio, 161
de alta resistencia, 112
Petrolenos, 345
Petróleo crudo, proceso de destilación fraccionada, 335
PG, enfoque de caracterización del asfalto, 347
Picnómetro, 179, 515
Piedra, 320
caliza, 92
triturada, 167
Plásticos
como aditivo para asfalto, 405
propiedades de tracción de los plásticos (experimento), 578–580
análisis y resultados, 580
aparatos, 578
probetas de ensayo, 578
procedimiento de prueba, 578–580
reforzados con fibra, 468
reforzados con partículas, 468
termoestables, 81, 84
Plegado (aluminio), 149
Plexiglás, 82, 84
Población, 29
Poisson, relación de, 6, 9, 291, 483
Polibutadieno (goma sintética), 81
Policloropreno (neopreno), 81
Polietileno, lámina de, 282
Poli-isopreno (goma natural), 81

Polímeros, 1–2, 81, 470–473
altamente ordenados, 84
comportamiento mecánico, 84–85
interenlaces, 81–82
módulo, 84–86
reforzados con fibra (fibra de vidrio), 473–475
y hormigón, 309
Polimetilmetacrylato (plexiglás), 82, 84
Prandtl, modelo de, 17–18
Precisión, 29
Preferencias regionales para los materiales, 27
Preservación de la madera, 443–445
disoluciones basadas en petróleo, 443
precauciones de construcción, 444–445
preservantes hidrosolubles, 443
técnicas de aplicación, 444
Preservantes hidrosolubles (madera), 443
Primario, enlace, 58–60
Probetas de hormigón cilíndricas
refrentado con azufre o un compuesto de recubrimiento (experimento), 535–539
aparatos, 535
procedimiento de recubrimiento, 536
Probetas de hormigón cilíndricas y de viga, preparación y curado (experimento), 531–534
aparatos, 31
precauciones, 534
procedimiento de prueba, 532–534
Producción, 27
de acero, 91–94
de aluminio, 146–148
de madera, 423–427
Productos de madera seca, 447
Propiedades eléctricas de la madera, 434
Propiedades térmicas de la madera, 433–434
Proporciones para la mezclas de hormigón, 249–269
mezclas de hormigón para proyectos pequeños, 267–268
pasos básicos, 250
contenido de agua requerido, 260
contenido de materiales comentosos requerido, 262
correcciones de la humedad, 263
facilidad de trabajo, 259–260
mezclas de prueba, 263
necesidades de aditivos, 262
necesidades de aireación, 258–259
necesidades de árido fino, 262–263
necesidades de árido grueso, 256–258
relación agua–materiales cementosos, 253–256
requisitos de resistencia, 250–253
Protección catódica, 135
Protones, 54
Pruebas. *Véase también* Ensayos
de compresión diametral, 295–296
de congelación y descongelación, hormigón asfáltico, 400
de dureza de Rockwell, 128–130
de flexión, 128
de maduración (hormigón), 300
de resistencia a la compresión (hormigón), 293–295
de resistencia a la flexión, 296–297
de resistencia a la penetración, 298
de tracción directa (asfalto), 353
de velocidad de pulsos ultrasónicos, 299
del martillo de Schmidt, 298
diametral de determinación del módulo de resiliencia, hormigón asfáltico, 398–400
del aluminio, 155–160
mecánicas del acero, 118–130
dureza, 128–130
flexión, 128
impacto con péndulo de Charpy, 125–127
tensión, 118–122
torsión, 122–125
ultrasónicas, 130
tradicionales de caracterización del asfalto, 354
Pulverización, 282
Punto de inflamabilidad, prueba para asfalto, 350
Punto de saturación de la fibra (FSP), 422
Puzolanas, 240–241

Quemaduras (defecto de la madera), 432

R

RCC (*Roller Compacted Concrete*), 311
Reacción eutectoide, diagrama de fase, 76–77
Reciclado de materiales para pavimentos, 402–404
a pie de obra, 404
de superficie, 403
en la planta central, 403–404
Recocido, 70
acero, 98–99
Recubrimiento de barrera, 134
Relajación, 14, 117
Relleno
aditivo para asfalto, 405
de densidad controlada (CDF), 302
fluido (hormigón), 302–304
no contraíble, 302
Remaches (aluminio), 161
Reológicos, elementos, 15

Reológicos, modelos, 15–19
Reómetro de cortante dinámica, ensayo, 351–352
Reómetro de flexión, 352
Reptación, 14–15, 288
madera, 436
Requisitos de resistencia para mezclas de hormigón, 250–253
Resinas, 345
Resistencia
a la abrasión y al desgaste, 26
a la compresión/área neta, 323
a la compresión/área total, 322
a la tracción de la unión, mortero, 330
de fluencia, 11
en función de la relación agua–materiales cementosos, curva, 254
indirecta a la tracción, 398
Respuesta dependiente del tiempo, 14–15
Retardantes, 236
Retícula espacial, 61, 63
Rocas, 78
ígneas extrusivas, 168
ígneas intrusivas, 168
metamórficas, 169
sedimentarias, 168–169
Rockwell, prueba de dureza, 129–130
Rodadas, 397
Rodillos vibradores, 275

S

S, calidad de elementos de mampostería de hormigón sólidos, 325
Sal y corrosión, 134
Sangrado, 397
Saybolt–Furol, viscosidad, 356, 364
pruebas, 355–356
SCC (*Self-Consolidating Cconcrete*), 301–302
Schmidt, prueba del martillo de, 298
Secundario, enlace, 57, 60
Seguridad, 21–23
Selección de materiales, factores económicos, 2–3
Semicoherente, contorno de grano, 69–70
Sesgo, 29
SHRP (*Strategic Highway Research Program*), 312, 346–347, 406
Silicato de calcio, 217
hidratado (C-S-H), 217
Silicio (agente de aleación del acero), 102
Sindiotáctico (polímeros), 82
Soldadura, 130–133
acero, 130–133
aluminio, 161
con arco, 131
de electrodo metálico en atmósfera inerte (GMAW), 161
de tungsteno en atmósfera inerte (GTAW), 161
métodos, 130
Sólidos inorgánicos, 77–80
cerámicas, 78–80
definición, 77
vidrio, 80
Sólidos metálicos, 61
Sólidos orgánicos, 80–86
definición, 80
elastómeros, 81
fusión y temperatura de transición del vidrio, 84
gomas, 81
materiales naturales, 81
plásticos termoestables, 81, 84
polímeros, 81–83
propiedades mecánicas, 84–86
termoplásticos, 80, 84
Solubles, materiales (diagramas de fase), 75–76
SSD, condición, 176
SSINA (*Specialty Steel Industry of North America*), 102
St. Venant, elemento de, 15–17
Superficie vibradora, 275
Superpave, método de diseño de mezclas, 338, 346, 366
Superpave, proceso de diseño de mezclas
contenido de aglomerante, 381–383
diseño de la estructura de los áridos, 375–378
evaluación de la sensibilidad a la humedad, 383
pasos, 373–383
pruebas simples de comportamiento (SPT) de, 383–387
prueba de deformación permanente bajo carga repetida triaxial, 386–387
prueba de reptación estática triaxial, 385–386
prueba del módulo dinámico, 383–385
selección de áridos, 373
selección del aglomerante, 375
Superplastificantes, 2
Sustancias nocivas en los áridos, 198–199
SW, calidad de ladrillos de construcción, 327

T

Tablas vibradoras, 275
Tableros con aserrado tangencial, 425
Tableros de tiras orientadas (OSB), 447, 480
Tapaporos de inhabilitación, 135
Tapaporos sacrificiales, 135
Tasa de deterioro, 3

Temperatura
de transición, 20
máxima del pavimento, 347
mínima de pavimento, 347
y materiales, 19–20
Templado (acero), 100
Tenacidad de un material, 13
Tendencia central, 30
Tensión, prueba de (acero), 118–122
Termitas, 442
Termoplásticos, 80–81, 84
Textura superficial, 26
Tiempo y materiales, 19–20
Tipos de acero estructural, 103–105
Titanio, aleaciones, 472
Torsiómetro, 125
Torsión, prueba de, 122–125
Trabajo, 13
Tracción, 57
Transformación tiempo–temperatura, diagrama, 98
Transformador diferencial variable lineal (LVDT), 36–38, 491–493
extensímetro con, 119
Trinidad, lago (asfalto), 335
Troncos (madera), 423
Tubo en U, 355

U

Uniones antideslizamiento, (pernos), 112
Uniones de impacto, 112
Urea–formaldehído (UF) en paneles/chapas estructurales, 448

V

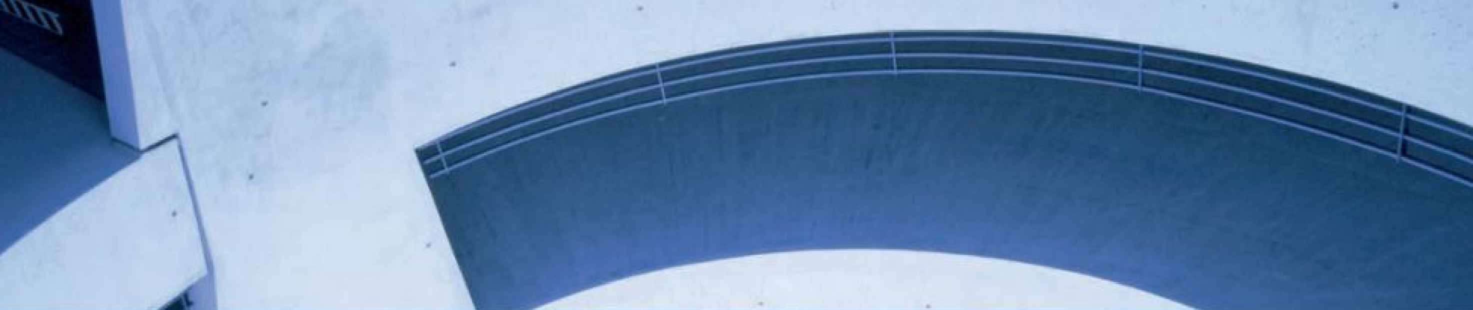
Valencia, electrones de, 56
Van der Waals, fuerzas de, 60
Vanadio (agente de aleación del acero), 102
Variabilidad de los materiales, 27–34
diagramas de control, 31–33
distribución normal, 30–31
equivocación, 28
error, 28
error experimental, 33–34
exactitud, 29
muestreo, 29–30
precisión, 29
sesgo, 29
Vetas resaltadas (defecto de la madera), 432
Vibración del hormigón, 274–275
Vibrador externo, 275
Vibrador interno, 274
Vicat, prueba de, 220–221
Vidrio, 1, 78–80, 84
ladrillos de, 320
Vigas en I, 460, 480
Vigas tubulares, 460
Viscoelástico, material, 15, 19
Viscosidad
absoluta, 355
cinemática, 355
de una emulsión, 356
Saybolt–Furol, 356
Viscosímetro rotacional (Brookfield), ensayo, 350
VSI (*Visual Stability Index*), 302

W-Y-Z

Windsor, prueba de la sonda de, 298–299

Yeso, 5, 215, 221
Young, módulo de, 6, 291

Zinc, 135
Zona termoafectada (HAZ), 133



Una de las funciones principales de la ingeniería civil es proporcionar y mantener las necesidades de infraestructura de la sociedad. Aunque algunos ingenieros están implicados en el proceso de planificación, la mayoría trabajan con el diseño, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura. El denominador común de todas estas responsabilidades es la necesidad de comprender el comportamiento y funcionamiento de los materiales.

A pesar de que no todos los ingenieros de Obras Públicas, Caminos e industriales y arquitectos tienen que ser especialistas en materiales, un requisito para todos los que trabajan en el diseño, la construcción y el mantenimiento es la comprensión básica del proceso de selección de los materiales y su comportamiento.

La investigación en materiales para ingeniería ha avanzado mucho en las últimas décadas. Como resultado, muchas materias convencionales se han eliminado o reemplazado por otras más eficaces o simplemente se han mejorado.

En esta segunda edición de *Materiales para ingeniería civil*, Mamlouk y Zaniewski proporcionan una visión actual y completa de los materiales empleados en ingeniería. Presentan una serie de aplicaciones prácticas que muestran sus características, usos y propiedades. Destacan en esta edición el tratamiento de todos los materiales más utilizados en la construcción, la importancia cuantitativa y cualitativa de sus propiedades, así como la revisión de sus características microestructurales. Contiene pruebas y experimentos de laboratorio ilustrados con abundantes imágenes y figuras, además de problemas y preguntas de revisión en cada capítulo.

PEARSON
Educación
www.pearsoneducacion.com

ISBN: 978-84-8322-510-3
9 788483 225103